



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2020

Klimaneutralität: ein Konzept mit weitreichenden Implikationen

Honegger, Matthias ; Schäfer, Stefan ; Poralla, Matthias ; Michaelowa, Axel

Abstract: Wird Deutschland bis zum Jahr 2050 klimaneutral oder nicht doch eher treibhausgasneutral beziehungsweise CO₂-neutral sein? Eines ist klar: Wir wollen den Klimawandel stoppen, haben uns dafür ein Ziel gesetzt und wollen es bis 2050 erreicht haben. Aber was genau eigentlich: Was hat sich Deutschland, was die Europäische Union und viele andere Länder zum Ziel gesetzt? Oder kurz gesagt: Was verbirgt sich eigentlich hinter dem Ziel Klimaneutralität? Diesen Fragen geht die von Perspectives Climate Research im Auftrag der dena erstellte Analyse „Klimaneutralität – ein Konzept mit weitreichenden Implikationen“ nach. Denn der genauere Blick zeigt: Auf die Details kommt es an.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich
ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-195545>
Published Research Report
Published Version

Originally published at:

Honegger, Matthias; Schäfer, Stefan; Poralla, Matthias; Michaelowa, Axel (2020). Klimaneutralität: ein Konzept mit weitreichenden Implikationen. Berlin: Deutsche Energie-Agentur.



dena-ANALYSE

Klimaneutralität

Ein Konzept mit weitreichenden
Implikationen

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel.: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
E-Mail: info@dena.de
Internet: www.dena.de

Autoren:

Matthias Honegger, Perspectives Climate Research
Stefan Schäfer, Institute for Advanced Sustainability Studies
Matthias Poralla, Perspectives Climate Research
Axel Michaelowa, Perspectives Climate Research

Konzeption & Gestaltung:

Heimrich & Hannot GmbH

Bildnachweis:

Titelbild – shutterstock.com/petrmalinak
S. 5 – Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)/Christian Schlüter

Stand:

10/2020

Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem
Zustimmungsvorbehalt der dena.

Bitte zitieren als: Deutsche Energie-Agentur (dena, 2020):
„dena-Analyse: Klimaneutralität – ein Konzept mit weitreichenden
Implikationen.“ Honegger, M.; Schäfer, S.; Poralla, P.; Michaelowa,
A.; Perspectives Climate Research gGmbH, Freiburg i. B.

Inhalt

Vorwort.....	4
Zusammenfassung	6
Einleitung.....	8
1. Begriff und Konzept der Klimaneutralität	10
1.1 Begriffsdefinitionen.....	10
1.2 Rolle der CO ₂ -Entfernung	12
1.3 Evolution und Verortung des Neutralitätsbegriffs auf internationaler Ebene	13
1.4 Potenzielle Konflikte zwischen den Neutralitätsbegriffen verschiedener Akteure.....	14
1.5 Klima- oder Treibhausgasneutralität in der EU	15
1.6 Bedeutung von Klimaneutralität für die klimapolitische Praxis	16
1.7 Schwache Klimaneutralität durch Ankauf von Emissionsgutschriften?	17
1.8 Klimaneutralität und die UN-Nachhaltigkeitsziele	17
2. Die Zahlen: CO₂-Budgets und Temperaturziele.....	18
2.1 THG-Metriken und ihre Implikationen	18
2.2 Temperaturziele in Abhängigkeit vom CO ₂ -Budget.....	18
3. Ausblick.....	22
3.1 Interaktionen verschiedener Akteursgruppen	22
3.2 Ziel-, Planungs- und Umsetzungskonflikte auf dem Weg zu Deutschlands Klimaneutralität.....	24
3.3 Politische Verteilungskonflikte innerhalb der EU	25
3.4 Implikationen für die sektorale Wirtschafts- und Klimapolitik.....	26
3.5 Verhalten des Erdsystems bei Klimaneutralität	27
3.6 Implikationen für die Planung von CO ₂ -Entfernungsmaßnahmen	28
4. Fazit	29
Anhang.....	30
Abbildungsverzeichnis	31
Tabellenverzeichnis.....	31
Literaturverzeichnis	32
Abkürzungen.....	38



Vorwort

Klimaneutralität, ja klar! Ein neuer Begriff hat sich in der Klimadebatte festgesetzt. Unternehmen wollen klimaneutral sein, Städte, Regionen, viele Länder und natürlich auch Deutschland und die Europäische Union. Es ist das ultimative Ziel, auch mit Blick auf die Erreichbarkeit der Pariser Klimaschutzziele.

Was aber genau meint Klimaneutralität eigentlich? Und wer muss es eigentlich bis wann erreichen, wenn bestimmte Ziele zu einem bestimmten Zeitpunkt auch erreicht werden sollen? Und: Hat wirklich alles Hand und Fuß, was unter dem Begriff versprochen wird?

Soviel vorweg: Es geht einiges durcheinander bei diesem Thema. Es geht schon damit los, dass manche von CO₂-Neutralität sprechen, andere wiederum von Treibhausgasneutralität. Das Letztere ist deutlich ambitionierter als das erste und beides ist aber noch längst nicht Klimaneutralität. Denn dazu gehören auch andere Aspekte, wie die Klimawirkungen von bestimmten Aerosolen – zum Beispiel aus dem Flugverkehr.

Im Klimaschutzgesetz steht, dass Deutschland bis 2050 treibhausgasneutral werden will. Und dennoch wird allgemein davon geredet, Deutschland wolle 2050 klimaneutral sein. Studien werden vorgestellt, in der es nur um die CO₂-Neutralität geht, diese aber soll schon im Jahr 2035 erreicht werden. Warum eigentlich?

Hinter dem Begriff verbergen sich viele Fragen. Große und kleine. Es geht um Treibhausgas-Budgets, die nach bestimmten Kriterien international verhandelt und verteilt werden. Es geht um die maximal mögliche Reduktion der Quellen und den massiven Ausbau von Senken. Und es geht um die geeigneten Instrumente.

Angesichts all dessen ist es erstaunlich, wie leichtfüßig mit dem Begriff umgegangen wird. Vor allem für die Politik hat das erhebliche Implikationen.



In der dena beschäftigen wir uns schon länger mit diesen Themen. Wir haben eine eigene „Querschnittsgruppe Klimaschutz“ eingerichtet und auf dem dena-Kongress im November 2019 eine entsprechende Experten-Diskussion dazu geführt, die online abrufbar ist. Nun aber wollten wir es ganz genau wissen und haben das Team der Perspectives Climate Research gGmbH beauftragt, alle damit verbundene Fragen mit uns zu diskutieren und aufzuschreiben. Die hier vorliegende „dena-Analyse Klimaneutralität – Ein Konzept mit weitreichenden Implikationen“ ist das Ergebnis. Es gibt viele Texte in diesen Zeiten. Diesen aber empfehle ich Ihnen in besonderer Weise.

Seien Sie herzlich begrüßt

Andreas Kuhlmann und
das dena-Team Klimaschutz

Zusammenfassung




Der Begriff „Klimaneutralität“ prägt die gegenwärtige Debatte wie kaum ein anderer. Was Klimaneutralität jedoch bedeutet, darüber sind sich die wenigsten einig.

Der Klimawandel wird gestoppt, wenn die physischen Treiber der Klimaveränderung sich weltweit gegenseitig neutralisieren. Würden geringen verbleibenden Emissionen von Treibhausgasen (THG) ebenso große Treibhausgasentfernungen entgegenwirken, wäre die „Treibhausgasneutralität“ erreicht. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der Effekte von Aerosolen ergäbe dies dann die eigentliche Klimaneutralität. Die „CO₂-Neutralität“, die einzig auf einen ausgeglichenen (neutralen) CO₂-Haushalt abhebt, ist weniger umfassend und müsste für die Einhaltung ambitionierter Temperaturziele schon bald erreicht werden. Das Pariser Klimaschutzabkommen wie auch der neueste Entwurf eines EU-Klimaschutzgesetzes zielen auf die Treibhausgasneutralität ab.

Eine schwache Definition von Klimaneutralität wird demgegenüber noch häufig von Unternehmen und teilweise auch von subnationalen Regierungen verwendet. Diese sieht den Erwerb von Emissionsgutschriften aus Emissionsreduktionsaktivitäten zum „Ausgleich“ eigener Emissionen vor. Solche Gutschriften werden aus einem Vergleich des Emissionsniveaus der Aktivität mit einem hypothetischen – womöglich ansteigenden – Referenzfall abgeleitet. Die Regeln für den Emissionshandel

im Pariser Abkommen sind noch in Verhandlung. Mit der Stabilisierung des Klimasystems wäre der Emissionshandel dann kompatibel, wenn der Referenzfall mittelfristig gegen null geht. Schwache Definitionen subnationaler Institutionen sind als freiwillige Maßnahmen nur dann unproblematisch, wenn die nationalen Klimaziele ambitioniert sind und Doppelzählungen vermieden werden.

In Szenarien, die aufzeigen, wie eine „starke“ Klimaneutralität erreicht werden kann, spielt die dauerhafte Entfernung von CO₂ eine essenzielle Rolle, wobei die geologische Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) eine zentrale Voraussetzung darstellt. Damit diese Szenarien nicht bloß Luftschlösser bleiben, müssten in allen Wirtschaftssektoren konkrete Ansätze zu ihrer Umsetzung, inklusive der dafür notwendigen ökonomischen und politischen Strukturen, identifiziert und vorangetrieben werden. Auch die gesellschaftliche Zustimmung wäre bei einer entsprechenden Transformation zentral, sodass aktiv auf die europäische Bevölkerung in einem vertrauensbildenden Dialog zugegangen werden müsste. Klimaneutralität ist ohne einen gesellschaftlich mitgetragenen, umfassenden politischen Gestaltungswillen, mit dem die Erforschung und der Einsatz von Negativemissionstechnologien vorangetrieben werden, nicht zu erreichen. Beispielsweise müsste das sehr restriktive deutsche CCS-Gesetz deutlich entschärft werden.



Der Begriff „Klimaneutralität“ prägt die gegenwärtige Debatte wie kaum ein anderer. Was Klimaneutralität jedoch bedeutet, darüber sind sich die wenigsten einig.

Der Entwurf der EU-Kommission für ein Europäisches Klimaschutzgesetz definiert ein THG-Neutralitätsziel bis 2050 sowie einen Mechanismus, anhand dessen die Ambitionen der Mitgliedsstaaten zur Emissionsreduktion kontinuierlich erhöht werden sollen. Außerdem ist eine Überarbeitung des Zwischenziels für 2030 im Gange. Mit den heutigen Zielen würden die der EU zustehenden 2-°C- oder gar 1,5-°C-Budgets möglicherweise überschossen. Sogenannte „Überschießszenarien“ sind äußerst problematisch, da sie größere Klimaschäden implizieren sowie die Wahrscheinlichkeit eines Überschreitens von Erdsystem-Kipppunkten erhöhen und der Folgegeneration eine kaum zu bewältigende Aufgabe aufgebürdet wird. Das verbleibende THG-Budget Deutschlands für einen 1,5-°C-Pfad ist nach gewissen Prinzipien der internationalen Lastenteilung bereits heute erschöpft oder gar überzogen und dasjenige für 2 °C (je nach Fairness-Ansatz) würde das Erreichen von Netto-Null-THG-Emissionen zwischen 2039 und 2085 erfordern. Weichenstellungen für die Klimaneutralität müssten also unverzüglich erfolgen.

Sollte sich das Konzept der Klimaneutralität (zumindest im Sinne der starken Definition der CO₂- oder Treibhausgasneutralität) weiter durchsetzen, was aktuell der Fall zu sein scheint, werden sich auf EU-Ebene neue Konfliktfelder herausbilden. Beispielsweise könnten osteuropäische Staaten, die bisher als Klimaschutz-„Bremser“ auftraten, verlangen, dass ihnen subventionelle Emissionsrechte zugestanden werden, während andere

europäische Staaten dies durch den überproportionalen Einsatz von Negativemissionstechnologien kompensieren müssten (ihre Emissionen also um mehr als 100 % reduzieren). So könnte die EU als Ganzes trotz fortbestehender Emissionsniveaus in manchen Staaten rechnerisch dennoch zur Treibhausgasneutralität gebracht werden.

Wenn Deutschland innenpolitisch mit dem EU-Ziel kompatibel agieren möchte, muss eine übergeordnete Strategie gefahren werden, welche die Machtpositionen der relevanten Interessengruppen im Blick hat und den wachsenden gesellschaftlichen Druck nutzt, um eine Dynamik zu schaffen, in der jeder einzelne Sektor eine sektorweite Klimaneutralität anstrebt. Eine solche Strategie benötigt einen vorwärts gewandten, ganzheitlichen Blick, wobei der im Klimaschutzgesetz vorgesehene Expertenrat mit Kurskorrekturfunktion eine gewisse Rolle spielen kann. Auch die dena-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ kann einen Beitrag dazu leisten, den gemeinsamen Blick nach vorne zu richten und konkrete Handlungsoptionen zu erarbeiten. Möglicherweise bietet auch das Beispiel des britischen Klimawandel-Komitees Elemente, die in Deutschland übernommen werden könnten – ein kontinuierlich aktives und breiter abgestütztes Expertengremium könnte möglicherweise eine politisch robustere Aufspannung von sektor- und ressortübergreifenden Planungsfragen erlauben.

Einleitung

Die Begriffe „Klimaneutralität“ oder „CO₂-Neutralität“ sind in aller Munde. Sie stehen für das Ziel, den menschlichen Einfluss auf das Klimasystem zu begrenzen – ein Wunsch, der mehr als drei Jahrzehnte Klimapolitik durchzieht. Jedoch werden die Begriffe oft unkritisch und äußerst unterschiedlich verwendet. Ihre heutige Präsenz ist symptomatisch für eine zunehmende Diskrepanz zwischen dem weithin artikulierten Wunsch nach einer Stabilisierung des Klimas und der Bereitschaft, das Handeln an den Tag zu legen, das notwendig wäre, um eine solche Stabilisierung zu erreichen. So steht der ambitionierte Zielkorridor von 1,5 °C bis 2 °C, auf den sich Staaten im Rahmen des Pariser Abkommens geeinigt haben, weiter ansteigenden globalen Emissionen gegenüber (siehe Abbildung 2). Obwohl in Deutschland schon seit dem Bericht der Klima-Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages von 1987 der Klimaschutz politisch präsent ist und die nationalen Treibhausgasemis-

sionsziele kontinuierlich verschärft wurden, verbleibt auch Deutschlands Minderungsrate ungenügend für das Ziel, die globale Erwärmung auf 2 °C (oder gar 1,5 °C) zu begrenzen.

Die globale Durchschnittstemperatur lag 2019 um 1,1 °C über dem vorindustriellen Wert (WMO, 2020), nahe dem Rekordwert von 2017 (siehe Abbildung 1). Im Gegensatz zu 2017 war aber 2019 kein „El Niño“-Jahr, was darauf hinweist, dass der im Pariser Abkommen genannte Zielwert von 1,5 °C bereits sehr bald erreicht sein wird. Zahlreiche Extremwetterereignisse – zum Beispiel Temperaturen von 42,6 °C in Paris und über 40 °C an der Nordseeküste – und deren Folgen wie großflächige Buschfeuer in Australien sowie das beschleunigte Abschmelzen des grönländischen Eisschildes unterstreichen diese besorgniserregende Entwicklung (UNEP, 2019; WMO, 2020).

Temperaturanomalie [K]

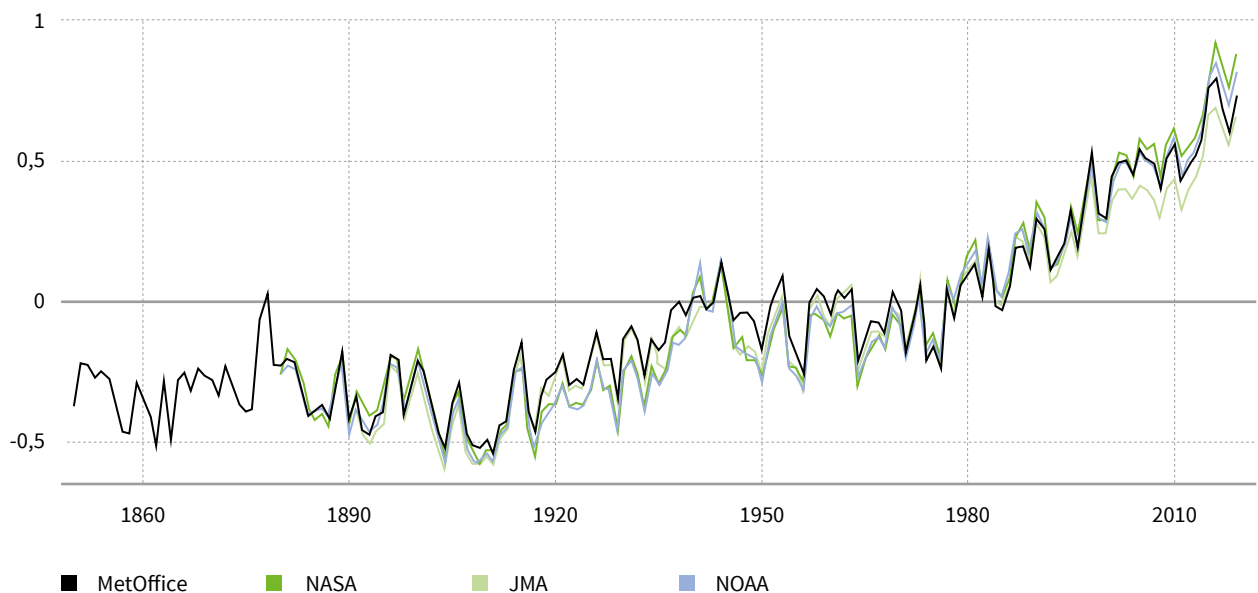


Abbildung 1: Globale Temperaturanomalie 1850 bis 2019 (Referenzzeitraum 1961 bis 1990), Quelle: Kaspar et al. (2020)

Nach einer vorübergehenden Verlangsamung in den Jahren 2015 bis 2017 beschleunigte sich der globale Anstieg der Treibhausgasemissionen 2018 (siehe Abbildung 2) und die seit 2000 deutlich zurückgegangene Abholzungsrate im Amazonasgebiet stieg wieder deutlich an (UNEP, 2019; WMO, 2019).

Andererseits stand das Jahr 2019 auch im Zeichen einer neuen gesellschaftlichen Dynamik und Sichtbarkeit der Klimaproblematik. Die „Fridays for Future“-Proteste unter der Führung der schwedischen Schülerin Greta Thunberg haben die Medienberichterstattung zum Thema stark angekurbelt und in einigen Ländern hat sich eine Priorisierung des Klimaschutzes auch in Wahl-

ergebnissen niedergeschlagen (Bennett, 2019). Politiker sehen sich nun unter Zugzwang, das völkerrechtlich verbindliche Pariser Abkommen jetzt auch wirklich entschlossen anzugehen und weitreichende Ansätze des Klimaschutzes wie eben auch die Forderung nach Klimaneutralität bis 2035 oder 2050 politisch zu verankern und entsprechende Transformationen auf den Weg zu bringen. Die Forderung nach Klimaneutralität ist dabei keineswegs neu, sondern findet sich einerseits in wissenschaftlichen Publikationen wie den Sachstandsberichten des Weltklimarats IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wie auch andererseits als Grundprinzip der UN-Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC).

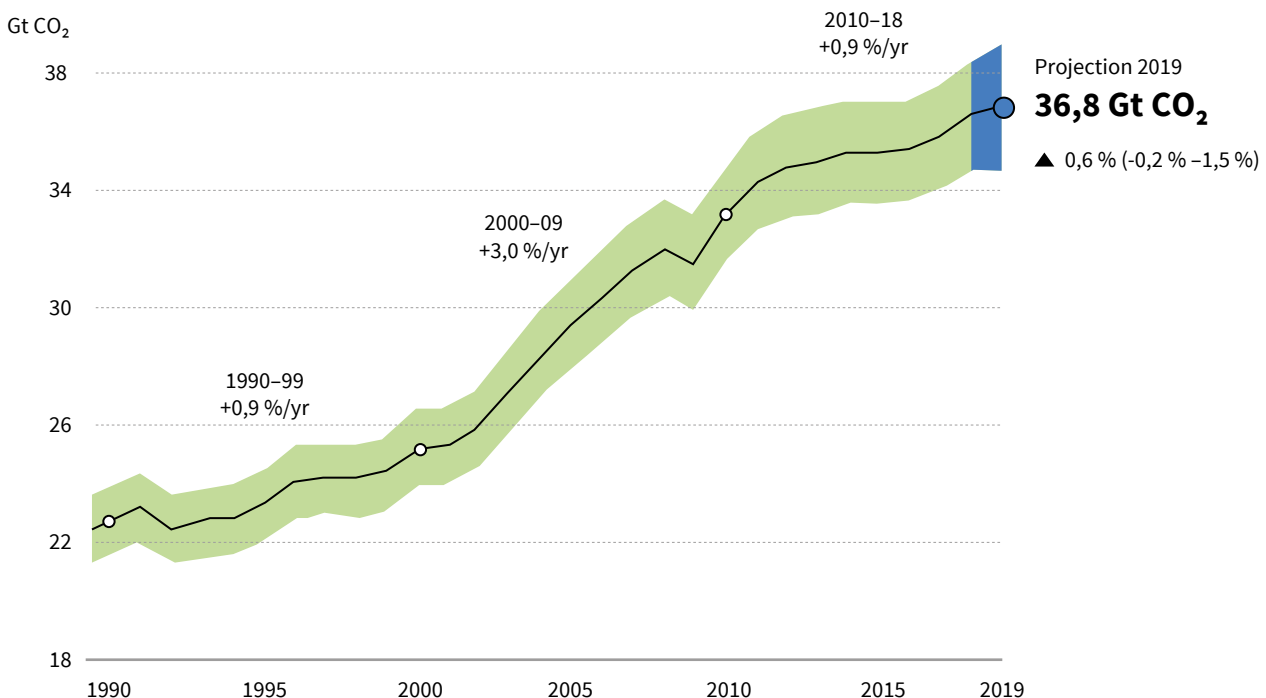


Abbildung 2: Globale Emissionskurve 1990 bis 2019, Quelle: Global Carbon Project (2019)

Vor diesem Hintergrund beleuchtet die vorliegende Analyse die Entwicklungen und die heutige Bedeutung bzw. Deutungen von Klimaneutralitätskonzepten und gibt einen Ausblick auf mögliche Implikationen für die deutsche Klimapolitik. In drei Teilen erörtert die Analyse folgende Aspekte:

1. die Genese des Begriffs „Klimaneutralität“;
2. die Zahlen für verbleibende Emissionsbudgets und
3. einen Ausblick auf Pfade zur Erreichung der Klimaneutralität

Teil 1 führt in das Konzept der Klimaneutralität ein und beschreibt definitorische Abgrenzungen sowie Meilensteine der Genese des Konzepts. Dabei werden auch konkurrierende Kon-

zepte der Klimaneutralität diskutiert und es wird die Bedeutung von Emissionsgutschriften erörtert. Teil 2 gibt einen Überblick über die numerische und methodologische Dimension der Debatte um Klimaneutralität wie Messgrößen, Treibhausgasbudgets und Fragen der kurzfristigen Überschreitung von Temperaturzielen, des sogenannten „Overshoot“. Zudem wird das Verhalten des Erdsystems bei Erreichen von Klimaneutralität skizziert. Teil 3 gibt einen Ausblick auf sektorspezifische Implikationen sowie eine mögliche Zuspitzung und Verbreiterung von Forderungen gegenüber der Politik und spezifischen Wirtschaftsbereichen. Dabei werden auch Planungs- und Zielkonflikte im Kontext verschiedener konkreter Handlungsfelder und Politikmaßnahmen skizziert.

1. Begriff und Konzept der Klimaneutralität

In diesem Teil werden für das Konzept der Klimaneutralität zentrale Begriffe vorgestellt und deren Genese beschrieben. Dafür wird nach einem definitorischen Einstieg ein historischer Überblick gegeben, der bis in die Anfänge des globalen Klimaregimes zurückreicht. Daran anschließend wird skizziert, wie das Konzept der Klimaneutralität im politischen Kontext verwendet wird und welche Handlungsfelder sich ergeben.

1.1 Begriffsdefinitionen

Die Diskussion von Neutralitätszielen ist teilweise von widersprüchlichen Annahmen und Begriffsdefinitionen gekennzeichnet. Begriffe wie „Klimaneutralität“, „Treibhausgasneutralität“ oder „CO₂-Neutralität“ werden oft irrtümlicherweise als ein und dasselbe verstanden, obwohl diese verschiedenen Konzeptionen längst nicht zum gleichen Klimaschutzresultat führen. Aus einer Reihe von Gründen, die im Folgenden erläutert werden, fokussiert sich diese Analyse auf das Konzept der globalen Klimaneutralität (sowie der daraus mittels Gerechtigkeitsprinzipien abgeleiteten Klimaneutralität auf nationaler Ebene).

1.1.1 Neutralität – durch Ankauf von Emissionsgutschriften oder durch Treibhausgasentfernung?

Neutralität kann hier verstanden werden als Zustand, in dem zwei Größen in ihrer entgegengesetzten Wirkung gleich groß sind und deren Wirkung sich gegenseitig aufhebt. In Bezug auf ihre Stringenz können zwei Interpretationen unterschieden werden: Die „schwache“ bezieht sich auf den Ankauf von Emissionsgutschriften aus emissionsreduzierenden Aktivitäten¹, die zur Kompensation tatsächlich anfallender Emissionen anderswo eingesetzt werden. Da diese Emissionsgutschriften durch Emissionsreduktionen gegenüber einem Referenzszenario entstehen, das womöglich mit steigenden Emissionen verknüpft ist, genügt diese Form von Neutralität nicht zur Stabilisierung des Klimasystems, da sie global betrachtet nur zu relativen Reduktionen führt.

Die „starke“ Definition einer absoluten Neutralität steht im Kontext von Langfristzielen daher im Zentrum. Hier halten sich Treibhausgasemissionen und -senken die Waage. Letztere umfassen prinzipiell natürliche Senken wie auch menschengemachte Senken durch den Einsatz von Negativemissionstechnologien (NETs). Theoretisch könnte Neutralität auch durch eine vollständige Einstellung aller Treibhausgasemissionen erzielt werden (Brutto-Null oder – bezogen auf CO₂ – eine komplette Dekarbonisierung). Dies ist jedoch unrealistisch, da das vollständige Eliminieren von Emissionen in mehreren Sektoren unmöglich oder mit prohibitiven Kosten verbunden wäre. Ein geringes Restniveau an Emissionen wird sich wohl als unvermeidbar herausstellen (in der Größenordnung einer einstelligen Prozentzahl der Emissionen von 1990). Wenn diesen entsprechende Treibhausgasenken gegenüberstehen, könnte die starke Form der Neutralität erreicht werden. Aber selbst wenn es gelänge, die Treibhausgasemissionen auf null zurückzufahren, könnte menschliches Handeln weiterhin das Klimasystem erwärmen, zum Beispiel durch den Strahlungsantrieb von durch den Flugverkehr verursachten Zirruswolken.

Die „schwache“ Form der Neutralität kann mit der „starken“ in Einklang gebracht werden, wenn das Referenzszenario (an dem Emissionsgutschriften gemessen werden) für die Erzeugung von Emissionsgutschriften mittelfristig auf null reduziert würde, wonach nur noch NETs-Emissionsgutschriften erzeugen und nur noch durch NETs erzeugte Gutschriften gehandelt werden könnten. Die Klimaneutralität als Langfristziel hat also große Implikationen für den Handel mit Emissionsgutschriften: Konventionelle Kompensation durch Emissionsminderung muss immer mehr von NETs-Kompensation abgelöst werden, je näher der Neutralitäts-Zielkorridor kommt.

¹ Emissionsgutschriften können sowohl durch Emissionsreduktionen gegenüber einem Referenzszenario als auch durch die Nutzung von Negativemissionstechnologien entstehen.

1.1.2 Unterschied zwischen Klima-, Treibhausgas- und CO₂-Neutralität

Im Kontext von Langfristzielen ist eine weitere Unterscheidung zwischen Klima-, Treibhausgas- (THG) und CO₂-Neutralität zu treffen (siehe Abbildung 3):

- Klimaneutralität ist die allumfassendste Form, in deren Folge die globale Durchschnittstemperatur unverändert bleibt, da sich hier sämtliche anthropogenen und natürlichen temperaturbeeinflussenden Faktoren ausgleichen. Sie ist klimapolitisch am anspruchsvollsten und im engeren Sinn möglicherweise unerreichbar. Dies liegt daran, dass jede Veränderung bei der Luftverschmutzung (z. B. durch Ruß, SO₂ oder Feinstaub) und der Wolkenbedeckung (Höhe und Art der Wolken) bzw. der Albedo (Farbe) der Erdoberfläche wärmend oder kühlend wirkt. Gewisse Effekte könnten möglicherweise untereinander bzw. durch zusätzliche Negativemissionen ausgeglichen werden², aber eine Feinsteuerung erscheint unmöglich.
- Treibhausgasneutralität beschreibt den Zustand, in dem eine Balance aus Quellen und Senken aller im Kyoto-Protokoll und Doha Amendment definierten THG³ herrscht. Da es bisher für Nicht-CO₂-THG kaum Negativemissionstechnologien gibt⁴, erfordert auch das Erreichen der Treibhausgasneutralität ein Übererfüllen in Bezug auf CO₂ (eine netto-negative CO₂-Emissionsbilanz).

- Die CO₂-Neutralität ist von den drei Neutralitätsformen die am wenigsten ambitionierte. Sie tritt ein, wenn alle CO₂-Quellen und -Senken ausgeglichen sind. Bei Erreichen einer globalen CO₂-Neutralität schreitet die Erwärmung des Klimas fort (wenn auch deutlich verlangsamt); sie kann also als Übergangsziel auf dem Weg zur Klimaneutralität betrachtet werden.

Die Klimaneutralität ist eindeutig die anspruchsvollste Neutralitätsform, wobei die wenigsten Institutionen sich bisher systematisch mit der Klimawirkung von Ruß, SO₂ und anderen Partikeln auseinandergesetzt haben und daher der Begriff „Klimaneutralität“ oft synonym zu „Treibhausgasneutralität“ oder gar zu „CO₂-Neutralität“ verwendet wird.

Der früher häufiger verwendete Begriff „Dekarbonisierung“ wird meist als das graduelle oder komplette Eliminieren von CO₂-Emissionen verstanden. Insofern bildet dieser Begriff einen (essenziellen) Teil der Klimaneutralitäts Herausforderung ab.

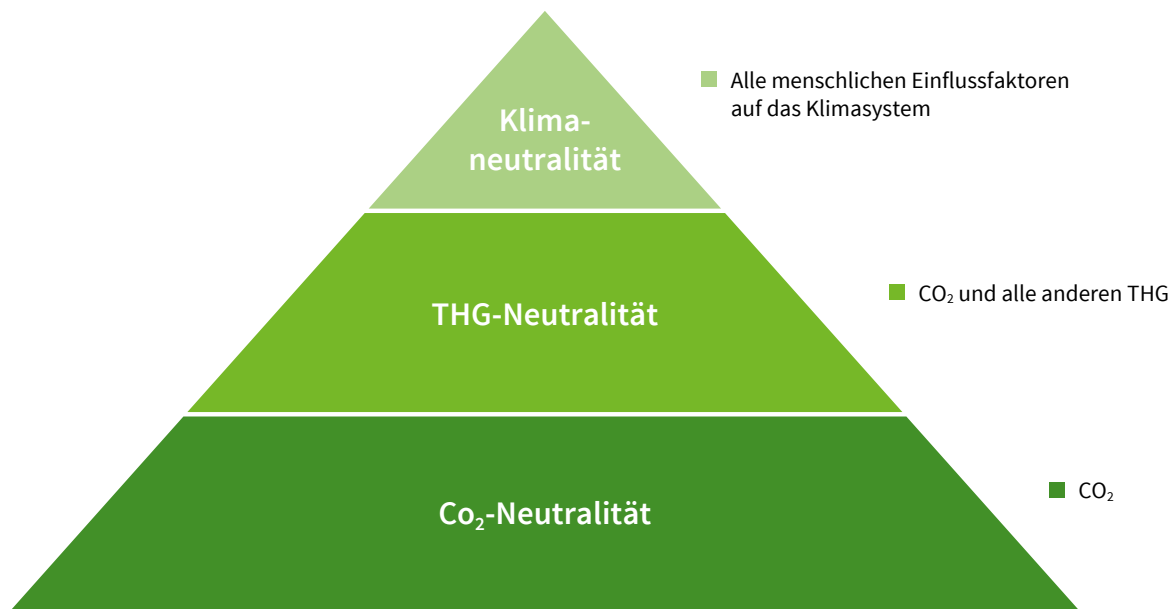


Abbildung 3: CO₂-Neutralität, THG-Neutralität und Klimaneutralität

² Der IPCC schätzt die kühlende Wirkung durch Aerosole seit Beginn der Industrialisierung auf rund -0,9 W/m², was dem gesamten anthropogenen Strahlungsantrieb in Höhe von 2,3 W/m² gegenübersteht (IPCC, 2014, S. 44). Aufgrund der Transformation der Energiesysteme und der Transportinfrastruktur ist zu erwarten, dass die Netto-Kühlungswirkung von Aerosolen in den nächsten Jahrzehnten abnimmt. Auch ein positiver Strahlungsantrieb ist denkbar (z. B. indem sich Schwefelemissionen stark reduzieren und Rußemissionen verbleiben). Eine solche Erwärmung müsste für die Klimaneutralität zusätzlich kompensiert werden.

³ Hierzu zählen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃) (UNFCCC, 2012).

⁴ Erste Vorschläge für die Entfernung von Methan aus der Umgebungsluft wurden in der Wissenschaft diskutiert, aber bisher nur marginal beachtet.

1.2 Rolle der CO₂-Entfernung

Die globale Klimaneutralität erfordert eine CO₂-Entfernung (durch Technologien wie auch natürliche Senken)⁵. CO₂-Entfernungstechnologien sind definiert durch eine (über ihren Lebenszyklus betrachtete) Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre, mit anschließender Speicherung im Untergrund oder in Ökosystemen oder Weiterverwendung des CO₂ als Rohstoff in langlebigen Materialien (z. B. im Bau). Wir beziehen uns im Folgenden bei der Verwendung dieses Begriffs nicht nur auf technologische Maßnahmen, sondern auf sämtliche biologischen, chemisch-physikalischen und kombinierten Prozesse, mit denen CO₂ aus der Atmosphäre dauerhaft entfernt werden könnte.

Durch Aufforstung, Steigerung von Bodenkohlenstoffgehalten, Wiederherstellung von Feuchtgebieten oder Ozeanalkalisierung⁶ können natürliche CO₂-Senken verstärkt werden. Ansätze wie Bioenergienutzung mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) oder das direkte Einfangen von CO₂ aus der Luft mit anschließender Speicherung (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) sowie viele ähnliche industrielle Prozesse könnten als Minderungsoptionen Eingang in die Klimapolitik finden (Schäfer et al., 2015). Zentral bei der Bewertung der verschiedenen

Speicherungsmethoden (Speicherung in biologischen Systemen oder in geologischen Speichern) ist die langfristige und verlässliche CO₂-Speicherung über Jahrhunderte („Permanenz“). Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, das eingefangene CO₂ als Grundlage neuartiger Materialien in industriellen Prozessen oder bei der Produktion von langlebigen Baumaterialien zu verwenden (sogenannte Carbon Capture and Utilization, CCU), sofern aus einer Lebenszyklusperspektive klargestellt ist, dass das CO₂ bei deren Lebensende nicht durch Verbrennen oder biologischen Abbau wieder in den Kohlenstoffkreislauf zurückgelangt.

Ob tatsächlich eine CO₂-Entfernung vorliegt, muss im Einzelfall auf Basis einer vollständigen CO₂-fokussierten Lebenszyklusperspektive festgestellt werden. So würde ein mit Erdgas oder Kohle betriebenes Kraftwerk mit CCS eine Emissionsreduktion darstellen, während es sich bei einem durch Biomasse betriebenen Kraftwerk mit CCS um eine CO₂-Entfernung handeln würde, da Letzteres über seinen Betrieb ursprünglich atmosphärisches CO₂ in den Untergrund bringt – vorausgesetzt, der Anbau der Biomasse, der Bau des Kraftwerks, der Transport der Biomasse zum Kraftwerk und der Transport des CO₂ zur Lagerstätte wären mit einem nur geringen Ausstoß an CO₂ und an anderen Treibhausgasen zu bewältigen (siehe Abbildung 4).

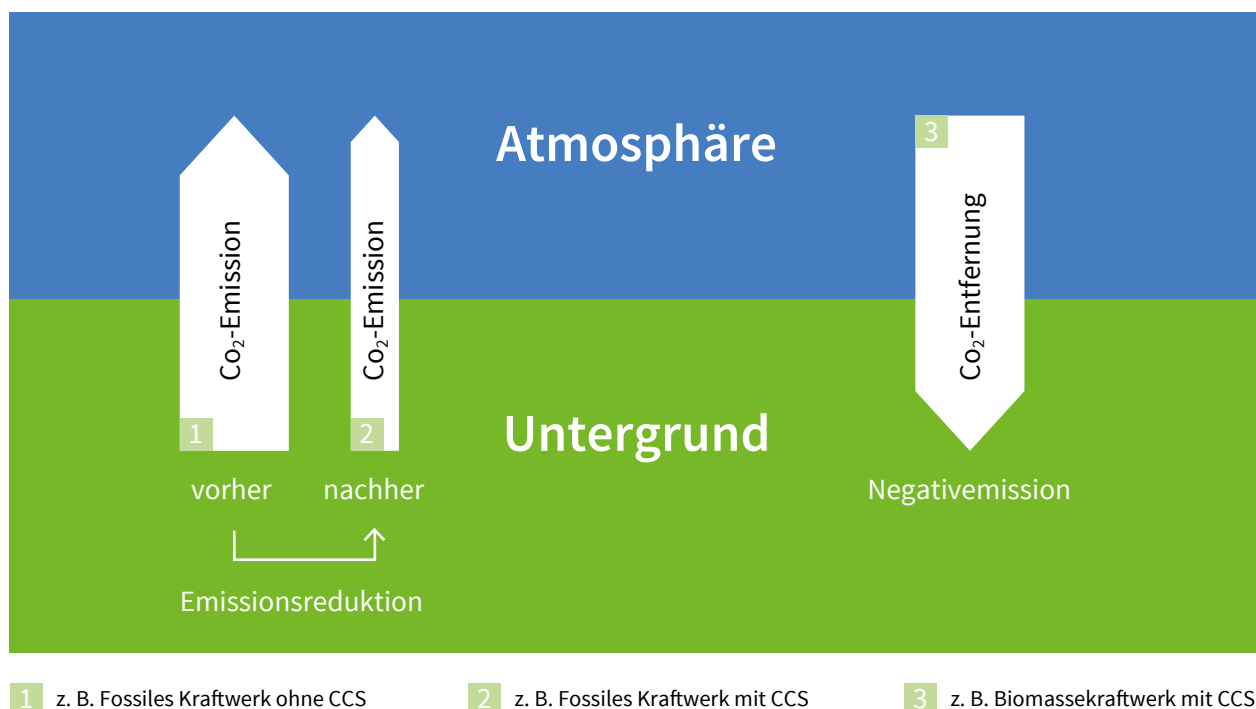


Abbildung 4: Der Unterschied beim Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) bei einem fossilen Kraftwerk oder bei einem Biomassekraftwerk. Ersterer führt zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen, während Letzterer zu einer CO₂-Entfernung oder Negativemissionen führen kann.

⁵ Zwar werden auch für Nicht-CO₂-Treibhausgase entsprechende Entfernungstechnologien diskutiert (Ming et al., 2016; Jackson et al., 2019), jedoch befinden sich diese noch nicht im Einsatz oder in der konkreten Entwicklung, sodass wir uns auf CO₂-Entfernung konzentrieren (Fuglestad et al., 2018; Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2018, S. 66).

⁶ Zugabe basischer Materialien in die Ozeane, was deren Versauerung entgegenwirkt und zu einer CO₂-Entnahme führen kann.

Wenn die Trennung von Emissionsreduktionen und CO₂-Entfernung nicht durch vergleichbare Methoden auf Projektebene vollzogen wird, können vermeintliche CO₂-Entfernungsmaßnahmen Minderungsambitionen untergraben. Dies wäre insbesondere dann der Fall, wenn solche Projekte fälschlicherweise CO₂-Entfernungszertifikate generieren würden.

Abgesehen von den technischen Fragen rund um die CO₂-Entfernung ist auch eine gesellschaftspolitische Auseinandersetzung um deren generelle Wünschbarkeit notwendig: Alle Indizien deuten darauf hin, dass das Einfangen von CO₂ aus der Luft oder die geologische Speicherung sowie die damit verbundene Notwendigkeit des Transports von CO₂ von der Bevölkerung kritisch gesehen werden. Dies steht im deutlichen Kontrast zur wissenschaftlichen Analyse, die schon seit 15 Jahren die Wichtigkeit solcher Technologien unterstreicht (IPCC, 2005). In Anbetracht des schwindenden CO₂-Budgets Deutschlands sollte in dieser Auseinandersetzung der direkte Zielkonflikt zwischen der Nutzung bzw. Nichtnutzung solcher Technologien und dem Verfehlen von Klimazielen deutlich herausgearbeitet werden (Honegger et al., 2017).

1.3 Evolution und Verortung des Neutralitätsbegriffs auf internationaler Ebene

1.3.1 Die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) und das Kyoto-Protokoll

Das Konzept der Klimaneutralität ist bereits in der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) aus dem Jahr 1992 verankert und taucht auch später an entscheidenden Stellen in der internationalen Klimapolitik auf. Die UNFCCC hat das erklärte Ziel, „(...) [eine] Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird (...)“⁷ (UNFCCC, 1992, Art. 2).

Die Minderung der Klimaveränderung soll eine solche Stabilisierung durch Reduktion der THG-Emissionen sowie Entfernung von THG aus der Atmosphäre erreichen: Der Vertragstext beschreibt Minderungsanstrengungen der internationalen Staatengemeinschaft als „(...) Maßnahmen zur Abschwächung der Klimaänderungen, (...) [durch die] sie ihre anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen [begrenzt] und ihre Treibhausgas-

senken und -speicher [schützt und erweitert] (...)“⁸ (UNFCCC, 1992, Art. 4.2.a). Minderung im Sinne der UNFCCC umfasst also explizit auch THG-Entfernung oder Negativemissionen – laut UNFCCC „(...) [ein] Vorgang, eine Tätigkeit oder ein Mechanismus, durch die ein Treibhausgas (...) aus der Atmosphäre entfernt wird (...)“⁹ (UNFCCC, 1992, Art. 1.8).

Das Kyoto-Protokoll von 1997 (UNFCCC, 1997) erlaubt den Industriestaaten explizit, bei der Erreichung ihrer verbindlichen Emissionsziele für die Periode von 2008 bis 2012 sowie 2013 bis 2020 THG-Entfernung einzusetzen. Es gab zwar langwierige Verhandlungen, wie exakt forstliche Senken definiert werden, aber letztlich wurden sie in großzügiger Weise auf die Zielerreichung angerechnet. Auch im Kontext der Marktmechanismen, genauer des Mechanismus für eine umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM), wurden Auf- und Wiederaufforstungsprojekte nach kontroversen Diskussionen zugelassen. Allerdings wurden für solche Projekte aufgrund des Risikos der Vernichtung der CO₂-Speicher in Wäldern nur temporäre Emissionsgutschriften ausgegeben. Da Staaten und Privatfirmen nur eine geringe Nachfrage nach solchen temporären Gutschriften entwickelten, blieb die Rolle von Forstprojekten im CDM marginal.

1.3.2 Das Pariser Klimaabkommen

Das Pariser Klimaabkommen von 2015 (UNFCCC, 2015) leitet langfristig die internationale Klimapolitik an. Dafür greift Artikel 2 des Pariser Abkommens auf den oben aufgeführten Artikel 2 der UNFCCC zurück und formuliert das Ziel, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf weit unter 2 °C oder gar 1,5 °C zu begrenzen. Artikel 4.1 definiert ein generelles Ziel der THG-Neutralität: „(...) in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken [...] herzustellen (...)“¹⁰. Artikel 5 unterstreicht die Bedeutung von Senken, die zur Bekämpfung der fortschreitenden Klimaveränderung geschützt und weiter ausgebaut werden sollen, fokussiert sich allerdings auf den Walderhalt.

Damit verbunden sind nationalstaatliche Verpflichtungen für die Vertragsparteien, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

⁷ Im englischen Originaltext lautet es: „(...) [to stabilize] greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system (...)“ (UNFCCC, 1992, Art. 2).

⁸ Im englischen Originaltext lautet es: „(...) limiting its anthropogenic emissions of greenhouse gases and protecting and enhancing its greenhouse gas sinks and reservoirs (...)“ (UNFCCC, 1992, Art. 4.2.a).

⁹ Im englischen Originaltext lautet es: „(...) any process, activity or mechanism which removes a greenhouse gas (...) from the atmosphere (...)“ (UNFCCC, 1992, Art. 1.8).

¹⁰ Maßnahmen, die zu einer CO₂-Entfernung führen, fallen also auch im Pariser Abkommen eindeutig in die Kategorie von Minderungsmaßnahmen. Siehe hierzu auch Honegger et al. (2019, 2013), EASAC (2018) und Horton et al. (2016).

1.3.3 Nationalstaatliche Verpflichtungen

Im Jahr 2020 müssen die Vertragsparteien des Pariser Abkommens sowohl ihre überarbeiteten nationalen Klimaschutzbeiträge (Nationally Determined Contributions, NDCs) für die Jahre 2025 oder 2030¹¹ als auch ihre langfristigen Minderungsstrategien (Low Emission Development Strategies, LEDS) bei der UNFCCC einreichen. Daher wird die 26. Vertragsstaatenkonferenz (Conference of the Parties, COP) der UNFCCC in Glasgow weitgehend im Zeichen der Verschärfung der NDCs stehen. Die NDCs sollen konkrete nationale Ziele und Schritte auf dem Weg zur globalen Erreichung der Pariser Temperaturziele festsetzen und in einem Fünfjahresturnus überarbeitet, gestärkt und anschließend erneut an die UNFCCC kommuniziert werden. Die LEDS hingegen blicken weiter voraus und geben die grundlegende Entwicklungsrichtung und -geschwindigkeit bis zum Jahr 2050 an.

Betrachtet man die NDCs, fällt auf, dass mit Ausnahme von Staaten mit großen Waldsenken und ohne substanzielle industrielle Aktivität (wie Bhutan und Suriname) kein Nationalstaat eine Klimaneutralität bis 2030 zu erreichen sucht (UNFCCC und UNDP, 2019; UNFCCC, o. D.). Dies mag in Anbetracht der Kürze der verbleibenden Zeit und des Ausmaßes der Transformationsleistung zu gewissen Graden nachvollziehbar erscheinen. Hierin offenbart sich allerdings auch das zugrunde liegende klassische Allmendeproblem der internationalen Klimaschutzkooperation: Da jedes Land seine Wirtschaftsleistung maximieren möchte, und das in der Regel eng mit der Verbrennung fossiler Energieträger verbunden ist, geschieht dies auf Kosten des Klimas. Die Transformation hin zu Klimaneutralität wird somit durch ein Trittbrettfahrerverhalten behindert, wonach Staaten zwar kontinuierlich neue und ambitionierte klimapolitische Ziele setzen, diesen aber nur ungenügend nachkommen. Das stetige Verschieben und Neudefinieren von Zielen resultiert folglich in ungenügenden Klimaschutzmaßnahmen. Dies ist auch ein Hinweis darauf, dass die Umsetzung von übergeordneten Klimaschutzzielen in detaillierten Gesetzesvorschlägen naturgemäß in einer Abwägung vielfältiger gesellschaftspolitischer Ziele stattzufinden hat.

Unter den langfristigen Strategien (LEDS) hingegen finden sich einige, die explizit die Klimaneutralität adressieren. Zu den Ländern, die solche Ankündigungen für eine Klimaneutralität bis Mitte des Jahrhunderts gemacht haben, zählen Costa Rica (2050), Dänemark (spätestens 2050), Neuseeland (2050) und Spanien (2050). Darüber hinaus streben weitere Länder wie Chile (2050), Fidschi (2050), Finnland (2035), Frankreich (2050), Island (2040), Japan (2050) und Norwegen (2030) eine CO₂-Neutralität in den nächsten Jahrzehnten an (Carbon Neutrality Coalition, 2020; Darby, 2019). Weitere Staaten haben ähnliche Ankündigungen gemacht, diese jedoch bisher nicht formal gegenüber der Klimarahmenkonvention kommuniziert.

1.4 Potenzielle Konflikte zwischen den Neutralitätsbegriffen verschiedener Akteure

Akteure benutzen die Begriffe „Klimaneutralität“ oder „CO₂-Neutralität“ auf unterschiedliche Art und Weise: Die Parteien (zumeist Staaten) im Pariser Abkommen haben wie in Abschnitt 1.3.2 dargelegt relativ klare Vorgaben und Definitionen, während Unternehmen und Nichtregierungsorganisationen in ihrer Interpretation frei sind und im Regelfall die „schwache“ Definition verwenden (siehe Diskussion in Abschnitt 1.1.1). Dementsprechend sind die Klimaneutralitätsansprüche Letzterer zumeist nicht mit national-staatlichen Neutralitätszielen vergleichbar.

1.4.1 Subnationale Regierungen

In föderalen Systemen haben Bundesstaaten, Regionen und Städte die Möglichkeit, ihre eigene Klimapolitik umzusetzen. Diese ist jedoch gleichzeitig auch Bestandteil der nationalstaatlichen Klimapolitik, wodurch entsprechende Maßnahmen und Minderungsergebnisse auf staatlicher Ebene an die UNFCCC kommuniziert werden. Solche Neutralitätsbekundungen können als Vorbilder dienen und andere Regierungen zur Nachahmung anreizen. Insbesondere in Ländern mit einer klimaskeptischen Zentralregierung (z. B. USA) wird diese Möglichkeit von progressiven subnationalen Regierungen proaktiv wahrgenommen, wie die Beispiele der US-Bundesstaaten Kalifornien und Hawaii, die CO₂-Neutralitätsziele bis 2045 verfolgen, oder der Stadt New York mit ihrer Dekarbonisierungsstrategie bis zum Jahr 2050 zeigen. Aber auch in anderen Teilen der Welt gibt es vergleichbare Dynamiken, wie beispielsweise die Bemühungen der Stadt Zürich, bis 2030 CO₂-neutral zu werden, oder die Selbstverpflichtung von Kopenhagen, bis 2025 klimaneutral zu sein (CNCA, 2020; Darby, 2019). Wenn mehrere subnationale Regierungen im selben Land solche Ziele verfolgen, stellt sich jedoch die wichtige Frage, wo Minderungen und Senken angerechnet werden. Bei fehlender Sorgfalt könnte es zu Mehrfachzählungen der gleichen Maßnahmen kommen.

1.4.2 Privatwirtschaft und zivilgesellschaftliche Organisationen

Ähnlich wie bei subnationalen Regierungen reiben sich die Klimaneutralitätsverständnisse von Unternehmen und anderen nichtstaatlichen Organisationen mit denen von Staaten: Mehr und mehr Organisationen deklarieren Ambitionen zur Erreichung ihrer betrieblichen Klimaneutralität. Dabei handelt es sich meistens um die schwache Form der Neutralität, wo institutionell direkt verursachte Emissionen durch Zukauf von Emissionsgutschriften ausgeglichen werden sollen. So haben sich mehrere

¹¹ Für einen Überblick über die eingereichten NDCs siehe Climate Watch (2020) und CAT (2020).

Verbände wie die FIFA, Unternehmen wie Microsoft oder Easyjet sowie zwischenstaatliche Organisationen wie die Weltbank oder die OECD dazu verpflichtet, ihren Tätigkeiten schon heute oder spätestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts klimaneutral nachzugehen (UNFCCC, 2020) – oder gar wie im Fall von Microsoft, eine netto-negative Emissionsbilanz anzustreben (Microsoft, 2020).

Wenn Klimaneutralität durch den Einkauf von Emissionsgutschriften erreicht werden soll, kommt es langfristig darauf an, wie die Referenzszenarien für Gutschriften definiert werden: Eine stringente Definition könnte beispielsweise darauf hinauslaufen, dass Emissionsgutschriften irgendwann nur noch für Negativemissionen ausgegeben werden, wodurch effektiv die starke Neutralität erreicht würde (siehe Abschnitt 1.1.1). Im Kontext des Pariser Abkommens wird die Verantwortlichkeit für die Anerkennung von Referenzszenarien wohl bei einem spezialisierten administrativen Organ liegen, das im Auftrag der staatlichen Vertragsparteien handelt (siehe UNFCCC, 2015, Art. 6). Auch freiwillige Emissionsmärkte könnten diese nutzen, um vergleichbare Resultate zu schaffen. Die heutige Norm ist jedoch weiterhin die schwache Neutralität, die letztlich irreführend ist, da sie langfristig mit dem Ziel der globalen Klimaneutralität nicht kompatibel ist. Es gibt beratende Organisationen, die solche Prozesse begleiten können, sie folgen jedoch keinen einheitlichen Regelwerken und sind oft durch die Verpflichtung zur Wahrung von Firmengeheimnissen daran gehindert, die entsprechenden Berechnungen transparent und vergleichbar darzulegen.

Vermehrt werden auch einzelne Produkte, Dienstleistungen und Infrastrukturanlagen als klimaneutral angepriesen – von klimaneutralen materiellen Konsumgütern bis hin zu klimaneutralen Kulturinstitutionen. Schön länger können auch Einzelpersonen ihren „CO₂-Fußabdruck“ durch persönliche Konsumentscheidungen nominell reduzieren – inklusive der Möglichkeit, CO₂-intensive Aktivitäten (z. B. Flugreisen) durch den Kauf von Emissionsgutschriften zu kompensieren. Dies allein würde langfristig ebenfalls nicht zur Sicherstellung von globaler Klimaneutralität ausreichen, es sei denn, diese Zertifikate würden durch CO₂-Entfernungsprojekte entstehen. Seit Neuestem gibt es erste Anbieter im freiwilligen Kompensationsmarkt¹² für Gutschriften aus Negativemissionstechnologien. Deren Berechnung folgt jedoch bisher noch keinen transparenten und durch unabhängige Dritte verifizierten Methoden. Insbesondere bei ökosystembasierten Projekten bestehen große Unsicherheiten, ob diese die langfristige CO₂-Speicherung garantieren können (Permanenz, siehe Abschnitt 1.2). Um die Transparenz und Glaubwürdigkeit solcher Aktivitäten zu steigern, sollten daher frühzeitig – beispielsweise im Rahmen erster „offizieller“ Projekte unter den kooperativen Mechanismen des Pariser Abkommens – spezifische Mess- und Berechnungsmethoden entwickelt und angewandt werden.

1.4.3 Ambitionierte Minderungsziele als notwendige Bedingung für wirksame subnationale Klimaneutralität jedweder Art

Für die Klimaneutralität von subnationalen Regierungen sowie privatwirtschaftlichen bzw. Nichtregierungsorganisationen besteht keine einheitliche Definition und diese Akteure sind auch nicht den gleichen Berechnungs- und Transparenzregeln unterworfen, die für Nationalstaaten unter der UNFCCC bzw. dem Pariser Abkommen gelten. Insbesondere gibt es keine Regeln darüber, ob bzw. inwieweit subnationale Akteure Minderungsaktivitäten im Ausland (über Zertifikate oder Anlagen im eigenen Besitz, zum Beispiel städtische Energieversorgungsunternehmen) auf ihre Zielerreichung anrechnen dürfen. Subnationale THG-Neutralität kann also grundsätzlich nicht mit nationalstaatlicher THG-Neutralität verglichen werden, solange diese Fragen nicht beantwortet und die Regeln vereinheitlicht oder zumindest von Fall zu Fall transparent dargelegt werden, um Doppelzählungen von Minderungen zu vermeiden.

Dies ist aber im Grunde unproblematisch, solange nicht der Eindruck entsteht, dass die subnationalen Maßnahmen und Ziele die eventuell mangelnden nationalen Maßnahmen ersetzen können. Denn grundsätzlich spiegeln sich umgesetzte subnationale Minderungsmaßnahmen innerhalb nationaler Grenzen letztlich in den nationalen Treibhausgasinventaren wider, sofern diese vollständig sind. Einkäufe von ausländischen Emissionsgutschriften sowie verkaufte Gutschriften aus Aktivitäten im Inland werden hier zugezählt und abgezogen, wodurch die Doppelzählung auf nationaler Ebene vermieden wird.

1.5 Klima- oder Treibhausgasneutralität in der EU

Vor dem Hintergrund der bedeutenden Rolle der EU in der internationalen Klimapolitik und ihrer deklarierten Absicht, als Vorreiter aufzutreten, beleuchten wir die jüngste Diskussion der EU über Klimaneutralität. Der EU ist es als einziger Großregion gelungen, ihre THG-Emissionen seit 1990 signifikant zu senken, so dass der Rückgang im Jahr 2019 bei 23 % lag (EEA, 2019). Diese Entwicklung ist zwar teils durch die EU-Aufnahme von osteuropäischen Staaten mit anderen Wirtschaftsstrukturen zu erklären, andererseits haben jedoch auch eine Reihe klimapolitischer Instrumente zur bisherigen Dekarbonisierung beigetragen. Für 2030 hat die EU in ihrer NDC ein Reduktionsziel von 40 % festgelegt, für 2050 ein unverbindliches von 80 % bis 95 %. 2018 wurde seitens der Europäischen Kommission vorgeschlagen, das Ziel für 2050 auf eine Reduktion von 100 % zu erhöhen (Europäische Kommission, 2018a). In diesem Zusammenhang hat die Kommission in zwei Dokumenten (Europäische Kommission, 2018b,

¹² Nori und Puro sind Plattformen, über die CO₂-Entfernungszertifikate angeboten werden. Die Firma Climeworks bietet zudem Zertifikate aus hauseigenen DACCS-Pilotprojekten an.

2018c) zum ersten Mal eine Vision formuliert, die sich mit der Frage der Klimaneutralität auseinandersetzt. Auf über 400 Seiten wird hier festgestellt, dass der bisherige Pfad, wonach bis 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 60 % stattfinden soll, zwar den Beitrag Europas zur Erreichung des 2-°C-Ziels decken würde, nicht jedoch den zur Erreichung des 1,5-°C-Ziels. Letzteres würde erfordern, dass Europa bis 2050 zu einem klimaneutralen Kontinent würde.

Darauf aufbauend wurden acht Szenarien entwickelt, von denen zwei dieses Langfristziel erreichen. Diese sehen eine wichtige Rolle für die CO₂-Entfernung durch BECCS vor, obwohl im vorgelegten Stakeholder-Prozess sowohl die Energiegewinnung aus Biomasse als auch die Abscheidung und Speicherung von CO₂ schlecht abgeschnitten haben. Es gibt hier also eine Spannung zwischen theoretisch scheinbar notwendigen Maßnahmen und deren politischer Umsetzbarkeit. Nach der Übernahme der Kommissionspräsidentschaft durch Frau von der Leyen wurde diese Vision aufgegriffen und in Form eines ambitionierten „European Green Deal“ präsentiert (Europäische Kommission, 2019) und weiter ausgearbeitet (Europäische Kommission, 2020a). Dieses Dokument stellt eine Absichtserklärung zur Klimaneutralität bis 2050 dar.¹³ Zentrale Aspekte seiner Umsetzung hängen von Entscheidungen des Europaparlaments und des EU-Rats ab. Diese können sich erfahrungsgemäß lange hinziehen und manchmal zu einer gewissen Verwässerung ambitionierter Vorschläge der Kommission führen.

Geden und Schenuit (2020) haben bemerkt, dass einige Kommentatoren des Green Deal kritisieren, dass die Zielvorgabe einer klimaneutralen EU bis 2050 nicht ambitioniert genug für die Ziele des Pariser Abkommens sei, was wohl jedoch auf einer Verwechslung von Klima- und CO₂-Neutralität basieren würde: Selbst die bisherige Ankündigung von 80 % bis 95 % Treibhausgasreduktion bis 2050 würde in das Pariser Zeitfenster passen, da eine globale Treibhausgasneutralität erst für den Zeithorizont von 2061 bis 2084 erreicht werden müsste (siehe Abschnitt 2.2). Die CO₂-Neutralität müsste zur Erfüllung des 1,5-°C-Ziels global jedoch früher erreicht sein (global bis 2050; in der EU wohl schon in den 2030er Jahren (IPCC, 2018)). Hier zeigt sich jedoch wiederum, dass ein glaubwürdiges Verfolgen einer THG-Neutralität eine konsequente Strategie zur Eliminierung der Netto-Emissionen aller THG in allen Sektoren erfordert; der bisher wenig hinterfragte nahezu alleinige Fokus auf CO₂ reicht dazu nicht aus.

1.6 Bedeutung von Klimaneutralität für die klimapolitische Praxis

Eine nationale strikte Klimaneutralität bis 2050 erfordert rasche, tiefgreifende und teils systemische Transformationsprozesse in allen Wirtschaftssektoren und Lebensbereichen. Eine einzelne Patentlösung wird es nicht geben, sondern es bedarf eines umfassenden Bündels an politischen Maßnahmen, ökonomischen Anreizen und Marktmechanismen, technischen Pilotprojekten sowie weiteren Instrumenten, um eine Minderung in dem Ausmaß und in den unterschiedlichsten Bereichen zu erreichen, die zu einer Klimaneutralität führt. Wenn auch diese Notwendigkeit auf der Hand liegt, wird im politisch-öffentlichen Diskurs oftmals eine einzige Lösungsidee in den Vordergrund gestellt, was den Blick auf das große Ganze gefährlich verschleiert und zu kontraproduktiven Entweder-oder-Diskussionen führt.



Kurzgeschichte der Patentlösungen in der Klimapolitik

Nachhaltige Lebensweise, Konsumverzicht, erneuerbare Energien, Green Growth oder Degrowth, Kernenergie, Kohlestrom mit CCS, BECCS, direkte CO₂-Entfernung durch künstliche Bäume, Milliarden von Bäumen pflanzen, Algenwachstum fördern, Agroecology beschleunigen, naturbasierte Lösungen implementieren – alles Schlagworte, die Maßnahmenkategorien schemenhaft skizzieren, die als Patentlösungen für das Klimaproblem in den Raum geworfen wurden. Viele werden konfrontativ und in Abgrenzung zu anderen Begriffen verwendet. Alle haben das (prinzipiell schwer abzuschätzende) Potenzial, zur Stabilisierung des atmosphärischen CO₂-Gehalts beizutragen. Keiner der Ansätze kann aber die globale Herausforderung allein lösen und dennoch wiederholt sich in der öffentlichen (und politischen) Wahrnehmung zyklisch eine Boom-Bust-Modeerscheinung, wie die vermeintlich allumfassende Lösung für die globale klimapolitische Herausforderung auszusehen hat (und welche anderen Ansätze damit gleichermaßen auszuschließen sind).

¹³ Allerdings wird nicht deutlich, inwiefern nicht-THG-klimatreibende Faktoren wie Ruß oder Schwefelemissionen in der Klimaneutralitätsdefinition berücksichtigt werden, und an vielen Stellen wird der Begriff „THG-Neutralität“ scheinbar mit „Klimaneutralität“ gleichgesetzt.

Der Begriff der Klimaneutralität spitzt zudem die zentralen Anliegen der Klimapolitik weiter zu: Bisher gängige Begriffe wie „Dekarbonisierung“, „Emissionsminderung“, „grüne Wirtschaft“ oder „Klimaschutz“ enthalten keine eindeutige Zielabsicht. Außerdem sind sie relativ (im Vergleich zu einem imaginären Alternativ-Szenario mit höheren Emissionen) definiert und zumeist auf kleinteilige Elemente des Gesamtgefüges bezogen. In einem solchen inkrementellen Paradigma können langfristig zielführende Maßnahmen nicht trennscharf von kurzfristig einsetzbaren Maßnahmen („Brückentechnologien“) unterschieden werden, da jede weitere vermiedene Tonne an CO₂-Emissionen zur Dekarbonisierung beiträgt. Demgegenüber stellt die Klimaneutralität einen eindeutig definierten Zielzustand dar. Dadurch erlaubt der Begriff eine wesentlich deutlichere und allgemeinverständliche Unterscheidung zwischen zielkompatiblen und zielinkompatiblen Maßnahmen (aufgrund ihrer Lebensdauer und CO₂-Intensität). Der Begriff umfasst zudem sämtliche Wirtschaftsbereiche und klimarelevanten Faktoren und in seiner ultimativen Form letztlich auch alle Weltregionen, da er durch seine absolute Wirkung auf das globale Klimasystem definiert ist.

1.7 Schwache Klimaneutralität durch Ankauf von Emissionsgutschriften?

Die projektbasierten flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls (Joint Implementation, Clean Development Mechanism) erlauben einzelnen Staaten, einen Teil ihrer Emissionsreduktionsverpflichtungen durch den Ankauf von Emissionsgutschriften aus anderen Staaten zu erfüllen. Wie in Abschnitt 1.1 diskutiert, werden solche Emissionsgutschriften als Differenz zwischen einem Referenzszenario und dem Emissionsniveau nach Durchführung der Maßnahme berechnet. Der dritte Mechanismus, der internationale Emissionshandel, erlaubt Regierungen, nicht benötigte Teile ihres Emissionsbudgets als Emissionszertifikate zu verkaufen, ohne dass spezifische Minderungsaktivitäten nachgewiesen werden müssen.

Im Pariser Abkommen finden sich internationale Marktmechanismen in Artikel 6 – die bilaterale Kooperation (Art. 6.2) und ein Marktmechanismus unter internationaler Aufsicht (Art. 6.4). Diese können sowohl Emissionsgutschriften als auch -zertifikate erzeugen. Nach zwei vergeblichen Anläufen 2018 und 2019 soll das Regelwerk dieser Mechanismen auf der COP 26 im November 2021 verabschiedet werden¹⁴.

Wie bereits in Abschnitt 1.1.1 diskutiert, erzwingt die Klimaneutralität ein Überdenken von Kohlenstoffmärkten; insbesondere müssen Referenzszenarien mittelfristig so definiert werden, dass der Anteil an Emissionsgutschriften ab- bzw. derjenige an CO₂-Entfernung auf dem Markt zunimmt. Besteht eine globale THG-Neutralität, bei der die Emissionen sämtlicher Staaten bei null liegen, sollten konzeptionell Emissionsgutschriften nur noch aus Negativemissionen generiert werden. Allerdings wird ein solcher Zustand global erst sehr spät eintreten. In einigen Ländern wird es noch lange positive Emissionen geben, während andere Länder möglicherweise bereits eine netto-negative Emissionsbilanz erreicht haben. Insofern wird in diesen Nachzügler-Ländern weiterhin eine Emissionsreduktion möglich sein, für die Emissionsgutschriften ausgegeben werden könnten. Generell wird die Erzeugung von Emissionsgutschriften durch Negativemissionen jedoch immer wichtiger werden, da Potenziale zur CO₂-Entfernung innerhalb gewisser Staatsgrenzen teilweise sehr gering sind und diese Länder dementsprechend die Potenziale anderer Staaten mobilisieren müssen, um die Klimaneutralität zu erreichen.

1.8 Klimaneutralität und die UN-Nachhaltigkeitsziele

Die UN-Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDGs), die im Kontext der 2030-Agenda für Nachhaltige Entwicklung der UN und als Nachfolger der Millenniums-Entwicklungsziele verabschiedet wurden, umfassen 17 breit formulierte Ziele der internationalen Staatengemeinschaft. Diese Ziele sind mit einer großen Zahl mehr oder minder spezifischer Indikatoren unterfüttert.

In Bezug auf Klimaneutralität spielt insbesondere das SDG 13 „Climate Action“ eine zentrale Rolle. Es verweist im Wesentlichen auf die Ziele des Pariser Abkommens, indem es Maßnahmen zur Treibhausgasmindering und zur Anpassung an die Auswirkungen sowie finanzierungs- und kapazitätsaufbauende Instrumente auflistet (ECOSOC, 2019, S. 18 f.). Insofern gelten die Anforderungen des Pariser Abkommens bezüglich der Stabilisierung des Klimasystems bzw. der Erreichung von Klimaneutralität ebenso für die Erreichung von SDG 13. Gemäß dem heutigen Verständnis könnte die Erreichung des Pariser Temperaturziels von zumindest 2 °C, was eine globale CO₂-Neutralität um die 2070er Jahre erfordern würde, eine notwendige Voraussetzung für das Erreichen von 16 der 17 SDGs sein (IPCC, 2018, S. 118 ff.).

¹⁴ Siehe Michaelowa et al. (2019) für einen Überblick über die relevanten Fragen.

2. Die Zahlen: CO₂-Budgets und Temperaturziele

2.1 THG-Metriken und ihre Implikationen

Im ersten Teil haben wir aufgezeigt, dass das Konzept der Neutralität je nach Interpretation eine erhebliche Unschärfe besitzt. Darüber hinaus beinhaltet ein THG-Neutralitätsziel die Problematik der Verrechnung von verschiedenen THG gegeneinander. Dies geschieht üblicherweise nach dem sogenannten globalen Erwärmungspotenzial (GWP) über einen 100-Jahres-Horizont (also GWP100). Man kann aber GWPs auch für andere Zeithorizonte berechnen: Je kürzer der Horizont, desto höher der „Wechselkurs“ kurzlebiger Gase. Liegt dieser sehr hoch, könnte es Anreize geben, kurzfristige Minderungsziele nahezu nur durch Anstrengungen im Bereich von kurzlebigen Gasen zu erreichen und die für die langfristige Klimaneutralität viel wichtigeren langlebigen Gase zu vernachlässigen. Angesichts einer Lebensdauer von CO₂ im Bereich einiger Jahrhunderte erscheint aber das GWP100 relativ ausgewogen.

Andere Metriken wie beispielsweise das Global Temperature change Potential (GTP) oder CO₂-forcing-equivalent emissions (CO₂-fe) sind vorgeschlagen worden (Fuglestad et al., 2018; Pierrehumbert, 2014), haben aber ihrerseits eigene Herausforderungen, sodass sie die internationalen Klimaverhandler bisher nicht überzeugen konnten. Vor allem dürfen die allgemeinen Metriken jedoch nicht vortäuschen, dass Maßnahmen in allen Bereichen gleichwertig sind; es sollte nicht dazu kommen, dass bestimmte Treibhausgase als unveränderliche „Restposten“ verbleiben, nachdem alle anderen auf null zurückgefahren worden sind.

2.2 Temperaturziele in Abhängigkeit vom CO₂-Budget

Die Stabilisierung des Klimasystems bei einer spezifischen Temperatur ist direkt mit einem globalen CO₂-Budget verknüpft, das über Annahmen zur Verteilungsgerechtigkeit zwischen den Staaten aufgeteilt werden kann.

2.2.1 Das globale CO₂-Budget für 1,5 °C oder 2 °C

Die Pariser Zielmarken-Begrenzung der Erwärmung auf deutlich unter 2 °C oder nach Möglichkeit 1,5 °C – sind direkt mit einem verbleibenden globalen CO₂-Budget assoziiert. Das CO₂-Budget entspricht dem kumulativen Volumen der Emissionen, die auf dem Weg zur CO₂-Neutralität noch emittiert werden können. Die meisten vorliegenden Studien beschränken sich auf ein CO₂-Budget und lassen die anderen Treibhausgase außer Acht und gehen davon aus, dass diese Gase weiter emittiert werden, was natürlich nicht schlüssig ist. Zur verlässlichen Projektion von THG-Budgets bzw. zu Pfaden, die auch noch andere Klimatreiber berücksichtigen, besteht noch Forschungsbedarf. Das seit Anfang 2018 noch zur Verfügung stehende globale CO₂-Budget für eine mindestens 50%-Chance der Erreichung des 2-°C-Ziels liegt zwischen 1.170 und 1.500 Gt CO₂ und dasjenige für das 1,5-°C-Ziel zwischen 420 und 580 Gt CO₂ (IPCC, 2018, S. 108; MCC, 2020).¹⁵ Bei einer Fortschreibung der heutigen Emissionswerte¹⁶ wäre das globale 2-°C-CO₂-Budget in 26 bis 34 Jahren und das 1,5-°C-Budget in 8 bis 12 Jahren aufgebraucht. Bei einem linearen Minderungspfad zu vollständiger Dekarbonisierung ohne Überschießen (siehe Abschnitt 2.2.2) ergäbe sich daher ein Zielkorridor für die globale CO₂-Neutralität zwischen 2072 und 2088 (2 °C) oder 2036 und 2044 (1,5 °C) (siehe Abbildung 5). Demgegenüber müsste die globale THG-Neutralität erst 2090 bis später als 2100 (2 °C) oder 2061 bis 2084 (1,5 °C) erreicht sein (IPCC, 2014, 2018; Millar et al., 2017; UBA, 2019a).

2.2.2 Die Problematik des Überschießens

Die Emissions- und Temperaturtrends der letzten Dekade zeigen deutlich, dass die Temperaturziele des Pariser Abkommens ohne Überschießen (Overshoot) des (zumindest 1,5-°C-) CO₂-Budgets (oder THG-Budgets) und damit ein vorübergehendes Überschreiten von 1,5 °C (oder gar 2 °C) kaum mehr zu erreichen sind (siehe Abbildung 6). Die Fortschreibung der derzeitigen NDCs bis 2100 würde zu einem Temperaturanstieg von über 3 °C führen: Die „Emissionslücke“ im Jahr 2030 zu einem 1,5-°C- bzw. 2-°C-kompatiblen Emissionspfad beläuft sich auf jährlich ca. 30 Mrd. bzw. 10 bis 15 Mrd. t CO₂äq (UNEP, 2019).

¹⁵ Zu beachten ist in diesem Zusammenhang die Komplexität der Budgetberechnung. So gibt es nach wie vor signifikante Unsicherheitsfaktoren, verschiedene methodische Vorgehensweisen und Metriken sowie unterschiedliche Einschätzungen zu den historischen und Nicht-CO₂-Emissionen, die Auswirkungen auf diese Zahlen haben (IPCC, 2018, 2014; Hausfather, 2018).

¹⁶ In 2017 betrugen die globalen jährlichen Emissionen 42 Gt CO₂ (+/- 3 Gt CO₂) (IPCC, 2018).

Gt CO₂/a

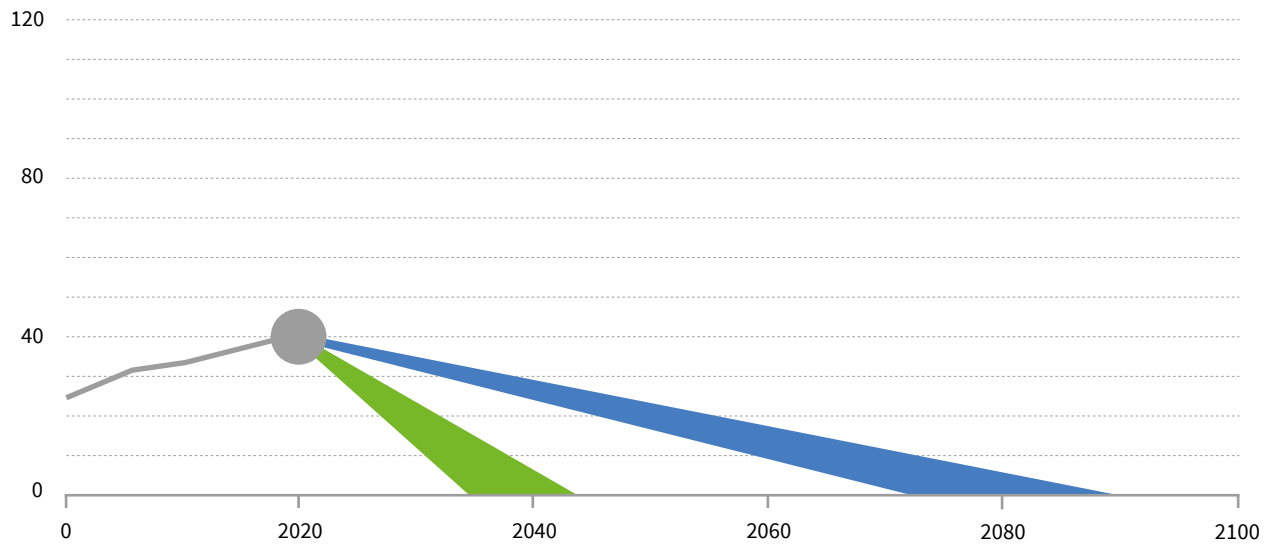


Abbildung 5: Lineare globale CO₂-Netto-Emissionspfade, die (mit mindestens 50 % Wahrscheinlichkeit) mit einer Erreichung des 1,5-°C- (grün) und 2-°C-Ziels (blau) ohne Überschießen kompatibel wären (eigene Darstellung).

CO₂ Emissions (Gt CO₂)

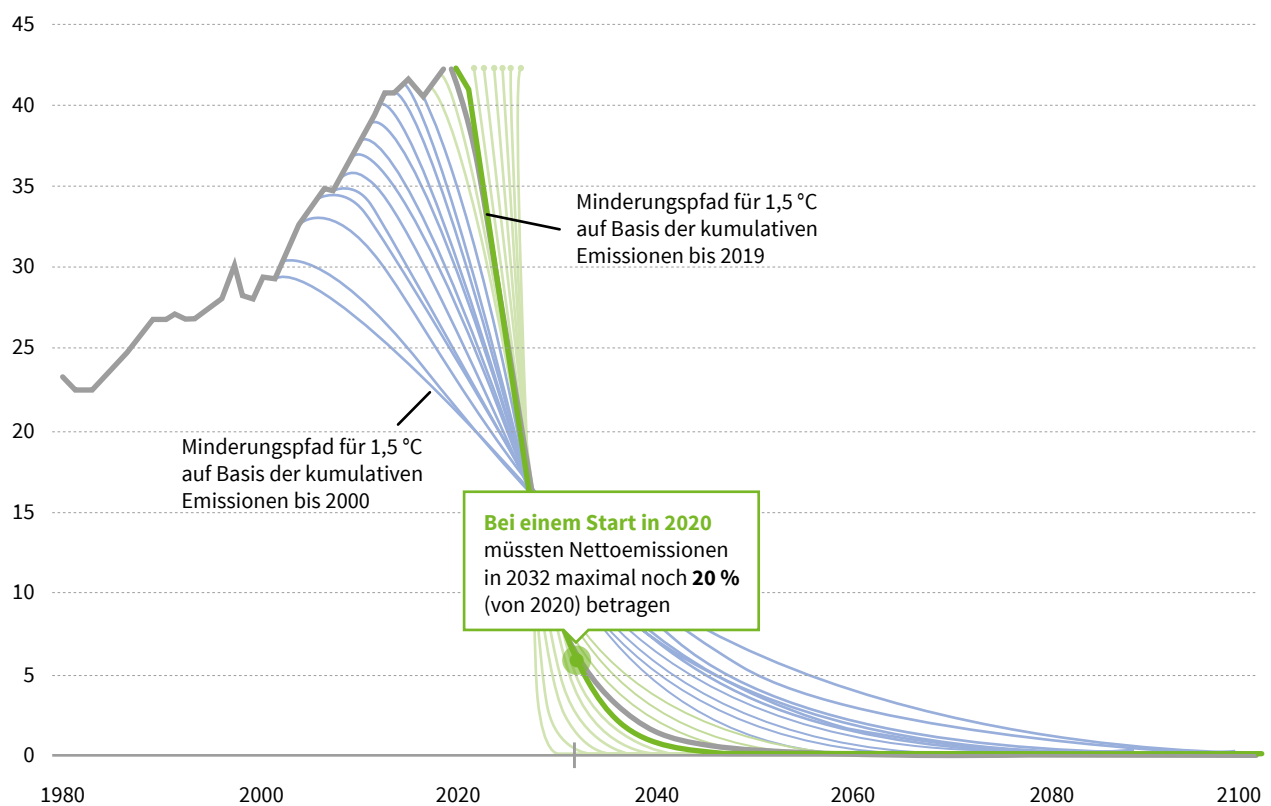


Abbildung 6: Minderungspfade, die zu einer 1,5-°C-kompatiblen Klimaneutralität ohne Overshoot führen würden, bedürften in Abhängigkeit vom Startzeitpunkt massivster globaler Maßnahmen. Hätte der Absenkpfad schon im Jahr 2000 begonnen, wäre er noch verhältnismäßig flach ausgefallen, bei einem Beginn in 2020 müssen die Emissionen im Jahr 2032 auf 20 % reduziert sein. Quelle: Carbon Brief (2019).

Nur ein dramatischer politischer Wandel, der zu einer drastischen Steigerung der NDCs, der Ausschöpfung aller technisch möglichen Emissionsreduktionen und einem massiven Einsatz von CO₂-Entfernungsmaßnahmen führen würde, kann unter günstigsten Umständen erlauben, das 2-°C-Ziel ohne Überschießen zu erreichen (IPCC, 2018; Lawrence et al., 2018).

„Overshoot and Return“-Szenarien liegen den meisten 2-°C- und allen 1,5-°C-Pfaden in IPCC-Berichten (2014, 2018) zugrunde und erhalten vor dem Hintergrund des zunehmenden Auseinanderklaffens des globalen Emissionspfads und der notwendigen Emissionsreduktion mehr und mehr Aufmerksamkeit. Dabei würde das verbleibende Budget zeitweise überzogen, um später durch einen globalen Netto-Negativ-Emissionszustand wieder zurückgeführt zu werden (Michaelowa et al., 2018a, 2018b). Solche Szenarien erfordern noch massivere Volumen an THG-Entfernung (bis über 20 Gt CO₂/a; IPCC, 2018), die jedoch angesichts der hohen technischen, politischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Barrieren nur schwer vorstellbar sind. Der größte Beitrag zur Verwirklichung solcher Szenarien wäre wohl

von den Industrienationen durch noch negativere CO₂-Bilanzen zu leisten. Außerdem auferlegen solche Szenarien die Last der Minderungsmaßnahmen in vollem Umfang einer künftigen Generation (zusätzlich zur Last der Klimaschäden). Die Klimaschäden sind darüber hinaus direkt mit der Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs korreliert, wodurch bei einem Overshoot (insbesondere von 2 °C) wesentlich stärkere Klimaschäden entstehen als im Falle eines gleichmäßigeren Temperaturpfads. Auch in der Absenkphase der Temperatur (sofern ein entsprechender Netto-Negativ-Emissionszustand denn erreicht werden könnte) entstünde zusätzlicher Anpassungsbedarf.

2.2.3 Deutschlands historische Emissionen

Die THG-Emissionen Deutschlands sind zwischen 1990 und 2017 jährlich um rund 1,2 % und insgesamt um rund 27,5 % zurückgegangen¹⁷ (UBA, 2019b; BMU, 2019). Dabei gibt es starke Schwankungen inklusive Rückschritten (siehe Abbildung 7).

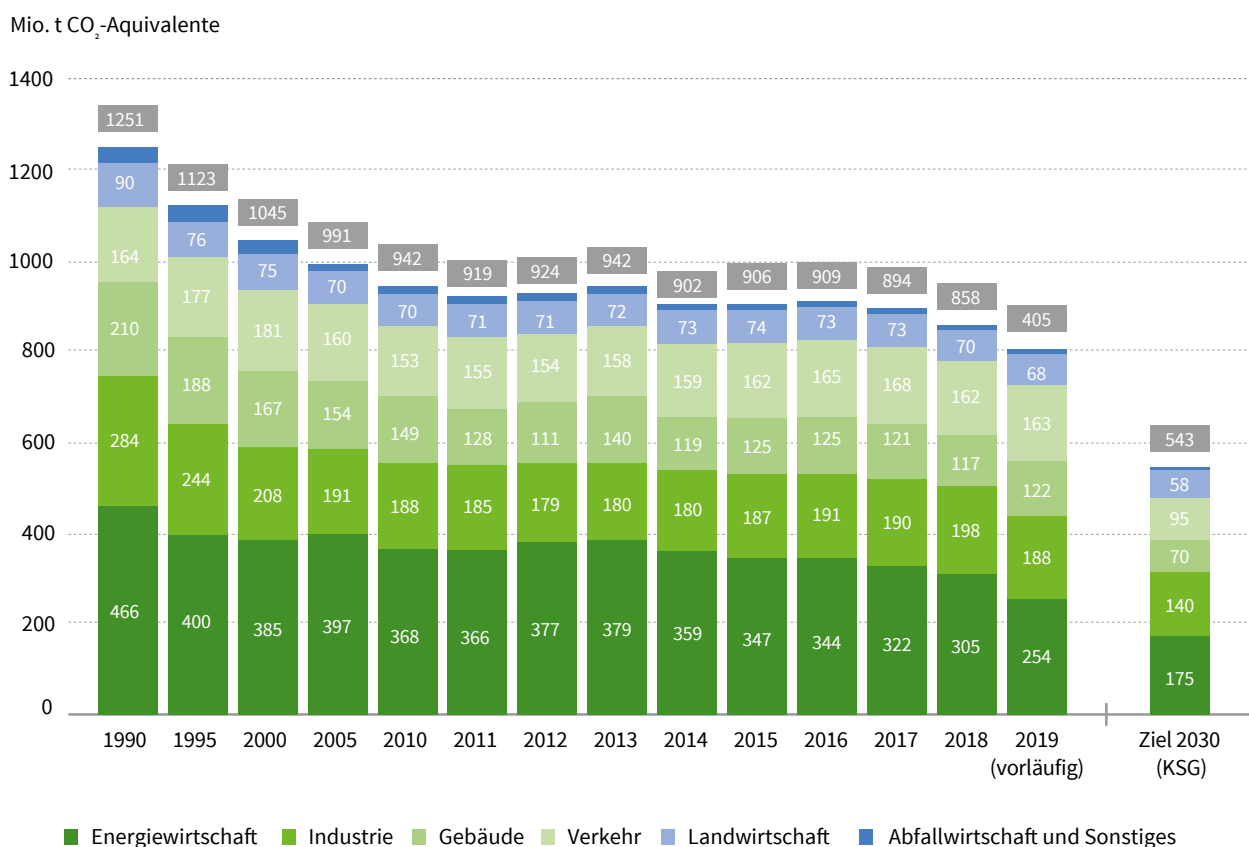


Abbildung 7: Entwicklung der THG-Emissionen Deutschlands seit 1990, Quelle: UBA (2020).

¹⁷ Nachfolgend sind die THG-Emissionen Deutschlands ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft aufgeführt.

Mit knapp 36 % entfällt der Großteil der Emissionen auf die Energiewirtschaft, gefolgt von Industrie (22 %), Verkehr (18 %), Gebäuden, Gewerben und Haushalten (15 %) sowie Landwirtschaft (8 %) und Abfallwirtschaft (1 %). Obschon die 6,3%-Reduktion in 2019 etwas ermutigen darf, zeigt bisher keiner der Sektoren einen Trend, der für das Erreichen eines Klimaneutralitätsziels zum Beispiel bis 2050 genügen würde.

2.2.4 Deutschlands CO₂-Budget für 1,5 °C oder 2 °C

Deutschlands zur Verfügung stehendes CO₂-Budget (ohne Überschießen) kann auf Basis verschiedener Equity-Ansätze zur fairen globalen Lastenverteilung berechnet werden. Solche normativen Annahmen erlauben es, den einzelnen Ländern bestimmte CO₂-Budgets zuzuordnen mit dem Ziel, eine normativ gerechte Lastenverteilung zwischen allen Ländern zu erreichen (WBGU, 2009; Messner et al., 2010; Rahmstorf, 2019; Pötter, 2019). Die UNFCCC bzw. das Pariser Abkommen geben zwar keine quantitativen Anhaltspunkte für eine länderspezifische Budgetaufteilung, jedoch hat sich das Prinzip der gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und jeweiligen Fähigkeiten (Common but Differentiated Responsibilities and Respective Capacities, CBDR-RC) über viele Jahre als Grundprinzip in den Verhandlungen etabliert. Dabei soll eine gerechte und faire Verteilung von Lasten und Kosten der Minderungsbeiträge angestrebt werden, welche die unterschiedlichen sozialen und wirtschaftlichen Bedingungen, die Historie sowie die Kapazitäten der Länder berücksichtigt. Es ist eindeutig, dass Deutschland aufgrund seines Entwicklungsstands und seiner Kapazitäten einen überdurchschnittlichen Minderungsbeitrag zu leisten hat, um den internationalen Erwartungen gerecht zu werden.

Von den fünf Equity-Ansätzen aus der wissenschaftlichen Literatur, die du Pont und Kollegen (2017) zusammenfassen, berechnen zwei sowohl für 1,5 °C als auch für 2 °C in 2020 ein negatives THG-Budget für Deutschland und der Durchschnitt aller fünf Ansätze ergibt zum März 2020 ein ausgeschöpftes THG-Budget für 1,5 °C. Drei weitere Ansätze kommen für das 2-°C-Ziel zu einem Restbudget, mit Netto-Null-Jahren zwischen 2075 und 2085. Im Durchschnitt erfordern die fünf Ansätze (wenn ein Überschießen ausgeschlossen wird) das Erreichen der THG-Neutralität in Deutschland im Jahr 2020 für 1,5 °C und – bei linearem Dekarbonisierungspfad – bis 2039 (in 19 Jahren) für 2 °C. Deutschlands jährliche Reduktionsrate ohne Überschießen betrüge demnach sozusagen 100 % für 1,5 °C, während diejenige für 2 °C bei jährlich mindestens 5 % liegen würde. Die durchschnittliche jährliche Reduktionsrate zwischen 2010 und 2019 lag bei weniger als 1 %, wobei die Reduktion zwischen 2018 und 2019 immerhin 6,3 % betrug.

Diese Werte zeigen die große Spannweite von nationalen Zielkorridoren in Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Annahmen zu Fairness und Temperaturziel, wobei die Reaktion des Klimasystems (die Klimasensitivität) eine zusätzliche Unsicherheit darstellt. Die Zielsetzung der THG- oder Klimaneutralität in Deutschland bis 2050 scheint dabei mit einem globalen Bestreben, unter 2 °C Erwärmung zu bleiben, kompatibel. Dabei scheint auch die Balance zwischen Fairness und Machbarkeit gegeben – sofern das Ziel ohne Verzögerung mit einer glaubwürdigen Gesetzesgrundlage unterfüttert und umgesetzt wird. Es ist jedoch zu betonen, dass vor dem Hintergrund dieser Zahlen alle Ansätze zur Emissionsreduktion und CO₂-Entfernung planerisch berücksichtigt werden sollten, es keinen Raum für Rückschritte in Deutschland mehr gibt und eine vorwärtsgewandte, glaubwürdige Umsetzung höchste Priorität hat.

3. Ausblick

Im Ausblick werfen wir einen Blick auf übergreifende, zukunftsgerichtete Implikationen des Klima-neutralitätsbegriffs für Deutschland. Dabei geht es um die Interaktionen einzelner Akteursgruppen, Ziel- und Planungskonflikte, „Technologie-Lock-in“ oder Ablenkungseffekte sowie die Implikationen globaler Erwartungen an Deutschland und der EU-Klimaneutralitätsziele für Deutschland.

3.1 Interaktionen verschiedener Akteursgruppen

Die Transformationsherausforderungen, die mit der Weichenstellung auf Klimaneutralität einhergehen, lassen sich nur durch das Zusammenwirken verschiedener Akteure meistern. Ein gemeinsames Herausarbeiten von sektor- oder gar technologie-spezifischen Problemkomplexen und politischen Lösungsansätzen muss dabei im Einklang mit den übergeordneten Zielen geschehen. Die dena-Leitstudie zur Klimaneutralität¹⁸ widmet sich dieser gemeinsamen Herausforderung. Nachfolgend beschreiben wir zentrale Akteursgruppen sowie mit der Klimaneutralität verknüpfte Erwartungen und Handlungsmöglichkeiten in verschiedenen Sektoren.

3.1.1 Die öffentliche Hand

Politische Akteure auf internationaler, nationaler sowie subnationaler Ebene können den öffentlichen Diskurs mitgestalten und den wirtschaftlichen Handlungsrahmen vorgeben. Im Kontext der Klimaneutralität spitzt sich die Forderung nach klaren Signalen und konsequenter Umsetzung entsprechender politischer Programme und Maßnahmen zu. Der Fokus könnte sich hier noch stärker auf die langfristige Gestaltung des politischen Instrumentariums und auf eine Beschleunigung des Technologiefortschritts mit Blick auf eine vollständig transformierte Weltwirtschaft und einen darin kompetitiven deutschen Wirtschaftsstandort richten. Die größere Klarheit, die mit dem Klimaneutralitätsbegriff geschaffen werden kann, erlaubt es, eine langfristige Planungs- und Orientierungssicherheit zu schaffen.

Diese planerische Klarheit kann die öffentliche Hand mit Finanzierungs- und Anreizstrukturen unterfüttern. Hierzu zählen neben fiskalischen Instrumenten wie einer Kredit- und Darlehensvergabe, Steuerpolitik oder der jüngst eingeführten CO₂-Bepreisung auch die Ausweitung und Stärkung von Marktmechanismen wie dem EU ETS (EU Emissions Trading System) oder den künftigen Marktmechanismen des Pariser Abkommens. Neben breit gefächerten Maßnahmen spielen auch die gezielte Unterstützung strategisch relevanter Bereiche durch Investitionen in öffentliche Infrastruktur (beispielsweise Elektromobilität) sowie gezielte Investitionen in Erforschung, Entwicklung, Demonstration und Förderung von Technologien (Research, Design, Development & Demonstration, RDD&D) eine wichtige Rolle.

Während zentrale übergeordnete Entscheidungen auf Bundesebene zu treffen sind, sind es insbesondere die nachgeschalteten subnationalen Ebenen wie Bundesländer, Regionen, Kommunen und Städte, die diese Entscheidungen mittragen und weitgehend auch implementieren müssen. Gerade der Ebene der Städte kommt hierbei besondere Bedeutung zu, da viele wesentliche Aspekte der Transformationen hin zu einer klimaneutralen Welt, beispielsweise der Stromversorgung, der Mobilität und der Städteplanung, hier koordiniert und umgesetzt werden müssen.

3.1.2 Entwicklungsbanken

Finanziell eng verbunden mit den politischen Akteuren agieren auch internationale Organisationen und multilaterale Entwicklungsbanken als ein weiteres Vehikel in der zukunftsorientierten Klimapolitik. Die Europäische Sustainable Investment Taxonomy (Europäische Kommission, 2020b) stellt eine strukturierende Grundlage dar, um Finanzströme gezielt für Emissionsreduktionen und gewisse CO₂-Entfernungsaktivitäten zu mobilisieren. Die allgemeine Taxonomie ist in Bezug auf die CO₂-Entfernung teilweise unvollständig, was möglicherweise durch die klimaspezifische Taxonomie bis Ende 2020 verbessert wird. Die jüngste Entscheidung der Europäischen Investitionsbank (EIB), zukünftig auf die Förderung von Projekten im gesamten fossilen Brennstoffbereich zu verzichten und die Klimainvestitionen von 25 % auf 50 % bis 2025 zu steigern, zeigt, dass sich diese Ausrichtung unter Entwicklungsbanken verbreitet. Außerdem

¹⁸ Aktuelle Informationen zur laufenden Leitstudie finden sich auf der Website der dena: <https://www.dena.de>

plant die EU-Kommission im Rahmen des Nachhaltigen Europäischen Investitionsplans das Errichten eines Mechanismus und Fonds für eine faire Transformation, der von der EIB mitgetragen werden soll. Die hier installierten Finanzierungskanäle stellen aufgrund ihrer substanziellen Investitionsbudgets sowie ihrer Vorbildfunktion zentrale Stellschrauben dar (Farand, 2019).

3.1.3 Privatwirtschaft

Die Rolle der Privatwirtschaft ist nicht zu unterschätzen, da grundsätzlich alle Wirtschaftssektoren an der Umsetzung von emissionsmindernden sowie CO₂-entfernenden Maßnahmen beteiligt sein müssen. Auch hier bietet der Klimaneutralitätsbegriff eine signifikante Hebelwirkung, insofern, als dass eine Erwartung geschaffen werden kann, dass ganze Sektoren auf Klimaneutralität ausgerichtet werden. Proaktiven Akteuren in der Privatwirtschaft bieten sich durch die Transformation zur Klimaneutralität Profilierungs-gelegenheiten und Innovationsmöglichkeiten gegenüber anderen Akteuren im In- oder Ausland, die die damit verbundenen weltweit langfristig wohl unaufhaltbaren Entwicklungen verpassen. Da sich transformative Veränderungsprozesse oft aus einer Kombination aus politischen, technologischen und wirtschaftlichen Veränderungen ergeben und vielerorts katalysierende wirtschaftliche Anreize vonnöten sind, kann ein kontinuierlicher, auf sektorale Klimaneutralität ausgerichteter Dialog zwischen Politik, Technologieentwicklern und der gesamten Privatwirtschaft dazu beitragen, Deutschlands Wirtschaft langfristig kompetitiv und mit Klimazielen kompatibel zu halten.

Bisher haben beispielsweise nur wenige Akteure in RDD&D in einzelnen Schritten der CCS-Kette investiert. Mit einem erneuerten Impetus durch die Klimaneutralitätsvision könnte bei entsprechender politischer Unterstützung jedoch in kommenden Jahrzehnten ein neuer Technologie-Exportzweig aufgebaut werden, der auf weltweit wachsende Nachfrage stoßen sollte. Die Energiewende zeigt ebenfalls, wie wichtig Kontinuität in der politischen Unterstützung eines einmal eingeschlagenen Transformationspfads ist. Zugeständnisse an bremsende Akteure in zentralen Fragen der finanziellen Anreize und Regularien haben den anfänglich erfolgreich geschaffenen Markt an erneuerbaren Energien mehrfach massiv einbrechen lassen. Klimaneutralität scheint nicht erreichbar, es sei denn, solch massive Verhinderungstaktiken lassen sich künftig vermeiden.

3.1.4 Forschung

Akteure aus der Grundlagen- bis hin zur anwendungsorientierten Forschung leisten wichtige Beiträge zur Entwicklung von Negativemissionstechnologien und deren Bewertung, wobei inter- und transdisziplinären Ansätzen eine immer wichtigere

Rolle zukommt: Das Konzept der Klimaneutralität könnte zu einer Stärkung der langfristigen Perspektive und einer systematischeren gesellschaftlichen Einbindung in Forschungsprozesse genutzt werden.

3.1.5 Zivilgesellschaft

Die Zivilgesellschaft beeinflusst seit dem Aufkommen der „Fridays for Future“-Bewegung im letzten Jahr zunehmend den klimapolitischen Diskurs. Auch wissenschaftsorientierte zivilgesellschaftliche Bewegungen wie die Gruppe „German Zero“¹⁹ werden wohl mehr und mehr die Begriffe Klimaneutralität oder Netto-Null nutzen, um anhand konkreter Vorschläge ein systematischeres Vorgehen der Politik zu fordern. Schon länger ist zu beobachten, dass sich auch Gewerkschaften, Sozialverbände, diverse Umweltschutzorganisationen und Kirchen hinter den umfassenden Klimaschutz stellen. Sollte sich ein breites gesellschaftliches Bündnis in einer gemeinsamen Vision der Klimaneutralität wiederfinden, das auch weiterhin verstärkten Druck auf die Politik und die Privatwirtschaft ausübt, dürfte dies helfen, politische Weichen zu stellen. An Schnittstellen verankerte Akteure wie die dena können die Dynamik ebenfalls proaktiv nutzen, um die Herausforderungen, Chancen und Risiken der anstehenden Transformationen unter Einbezug des besten verfügbaren wissenschaftlichen Verständnisses sowie sektorspezifischer Praxiserfahrung zu erörtern und anzugehen.

3.1.6 Partizipative Prozesse

Eine robust aufgestellte, inklusive und partizipative Teilnahme von verschiedenen Akteuren ist essenziell, um große und komplexe Weichenstellungen zu vollziehen. Die beispielsweise von der deutschen Bundesregierung installierte Strukturwandelkommission mit Vertretern aus verschiedenen Bereichen und Sektoren hat deutlich gemacht, dass eine progressive und weitreichende Nachhaltigkeitspolitik nur dann gelingen kann, wenn die betroffenen Menschen im Sinne eines fairen Strukturwandels „abgeholt und mitgenommen“ werden. Sollte der Begriff der Klimaneutralität mehr in den Vordergrund gerückt werden, könnte dies erlauben, auch in solchen Kontexten den Blick auf eine wünschenswerte Zukunft zu richten. Der Klimaneutralitätsbegriff könnte zusätzlich auch aufzeigen, dass aber solche Einzelkommissionen allein in Anbetracht der übergeordneten Herausforderung auf dem Weg zur Klimaneutralität nicht ausreichen, sondern übergeordnete Entscheidungsprozesse notwendig sind. Das britische Klimawandel-Komitee bietet hier ein Beispiel, wie ein von höchster politischer Stelle eingesetztes, unabhängig agierendes Expertenkomitee zwingende strategische Fragen mit großer Souveränität angehen und die öffentliche Entscheidungsfindung unterstützen kann (CCC, 2020).

¹⁹ Siehe Webauftritt der Bewegung German Zero: <https://germanzero.de/>

3.2 Ziel-, Planungs- und Umsetzungskonflikte auf dem Weg zu Deutschlands Klimaneutralität

Abwägungen und Konflikte zwischen gesellschaftlichen Zielen, Maßnahmen und Akteuren sind bei den mit der Klimaneutralität verbundenen tiefgreifenden Transformationsprozessen unvermeidbar. Dabei können gesellschaftliche Zielkonflikte sowie Planungs- und Umsetzungskonflikte unterschieden werden.

3.2.1 Gesellschaftliche Zielkonflikte

Obschon vielfach auf ein einziges Ziel zugespitzt, sind Nachhaltigkeitstransformationen von einer Vielfalt gesellschaftlicher anzustrebender Ziele geprägt. Die 17 Ziele der Nachhaltigen Entwicklung der Vereinten Nationen (SDGs) illustrieren diese Tatsache, ebenso wie die politische Realität, in der kaum je ein einziges Ziel in Isolation verfolgt werden kann oder soll. Dabei können verschiedene Ziele politische Abwägungen und Kompromisse erfordern oder im besten Fall gegenseitige Vorteile oder Synergien erlauben. Rufe nach einem fairen Strukturwandel (Just Transition), Energiesicherheit, vorausschauender Dekarbonisierung und der Ausrichtung auf zukunftsfähige Industrien und Arbeitsplätze sind allesamt gerechtfertigt und müssen Berücksichtigung finden. Dabei sind naturgemäß in Deutschland und international – wie anhand der UN-Nachhaltigkeitsziele illustriert – Ressourcen-Verteilungen und diverse positive und negative Auswirkungen mit Konflikten zwischen klimapolitischen Lösungsansätzen und gesellschaftlichen Zielen verbunden. Eine systemische Betrachtung von direkten und indirekten Auswirkungen von Lösungssystemen – eingebettet in politische und gesellschaftliche Realitäten – kann die Grundlage für eine partnerschaftliche Lösungssuche und Umsetzung darstellen (Frischmann et al., 2020). Dabei müssen die dazu notwendigen Abwägungen heute in beschleunigter Form stattfinden, wobei der Begriff der Klimaneutralität die Dringlichkeit weiter verdeutlicht.

Die Geschwindigkeit von Strukturwandel erscheint ein zunehmend prominenter Zielkonflikt. Dabei zeigt sich, dass die nach Wirtschaftssektor unterschiedlichen sachbedingten Geschwindigkeiten von materiellen und immateriellen (also institutionellen und gesellschaftlichen Verhaltensweisen und Rollen) Prozessen einen großen Einfluss auf die möglichen Geschwindigkeiten von Transformationen haben. So ist es beispielsweise seitens der Konsumenten denkbar, bei einem entsprechenden Angebot an Produkten innerhalb weniger Jahren auf die elektrische Mobilität umzustellen, währenddessen Strukturen auf der Produktionsseite (institutionell, personell und sozial) eine sorgfältig und partizipativ gestaltete Umstellung erfordern. Auch die Gebäude-Sanierungsraten können prinzipiell durch Anreize etwas erhöht werden, jedoch scheint eine dramatische Erhöhung entsprechender Investitionen kaum mit geltenden rechtsstaatlichen Grundsätzen vereinbar.

Es deutet sich daher an, dass sich die Abwägungsdebatten angesichts des Zielerreichungsdrucks, der mit der Klimaneutralität einhergeht, deutlich verschärfen könnten, was das Potenzial hat, Lösungsansätze im Keim zu ersticken – wenn eine konstruktive, partnerschaftliche und glaubwürdige gesellschaftliche Auseinandersetzung fehlt.

3.2.2 Planungs- und Umsetzungskonflikte

Selbst wenn gesellschaftliche Ziele in großen Zügen auf breite Zustimmung stoßen und sich im Grundsatz synergetisch gegenseitig bedingen, sind Planungs- und Umsetzungskonflikte zu erwarten. Eine vorausschauende und iterative Planung der miteinander verzahnten politischen Maßnahmen kann diese proaktiv aufgreifen und das Risiko minimieren, dass solche Detailkonflikte den Gesamtfortschritt blockieren. Es besteht gleichzeitig die Gefahr, sich mit einem Tunnelblick nur auf Einzellösungen zu fokussieren oder sich zu sehr in der Sackgasse von Übergangstechnologien wiederzufinden. Das Ziel der Klimaneutralität erfordert ein kontinuierliches Verfolgen des gesamten Spektrums an Möglichkeiten und Instrumenten über einen iterativen Prozess des Planens, Ausführens, Überprüfens und Korrigierens.

Hinzu kommt zudem noch der internationale und zwischenstaatliche Abstimmungsprozess, der für sich schon etliche Fragestellungen aufwirft, wie zum Beispiel:

- Welche Emissionen werden als Restemissionen anerkannt, die auch weiterhin ausgestoßen werden dürfen und die durch Ankauf von Emissionsgutschriften kompensiert werden müssen?
- Wer nimmt die Kompensationen vor und wer finanziert sie?
- Wie wird die Lastenverteilung zwischen Sektoren und zwischen Staaten gestaltet, wenn durch CO₂-Entfernung eine Emissionsreduktion von über 100 % prinzipiell möglich ist und somit an anderer Stelle weniger als 100 % reduziert werden muss, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen?
- Gibt es Kompensationszahlungen von Transportunternehmen an Energieunternehmen, wenn Letztere die CO₂-Emissionen der Ersteren durch BECCS kompensieren?
- Werden Deutschland und Frankreich ein stärkeres Reduktionsziel (z. B. von 120 %) verfolgen, damit in Polen die Emissionen nicht auf netto-null fallen müssen (z. B. nur um 70 % reduziert)?

Dies sind nur einige der sich schon heute abzeichnenden Fragestellungen. Sie machen schon jetzt deutlich, dass das Konzept der Klimaneutralität auch im Detail Umsetzungskonflikte bedingt, die proaktiv angegangen werden müssen.

So besteht auch die Notwendigkeit, durch sektorspezifische Konflikte zu navigieren (z. B. der Kohleausstieg oder kommende Transformationsprobleme in der Automobilindustrie). Solche Konflikte erfordern ein großes Geschick und ein substanzielles politisches Durchhaltevermögen, um entsprechende eventuell jahrelange Verhandlungen mit betroffenen Stakeholdern aus Politik, Wirtschaft, Forschung und Umweltschutzorganisationen erfolgreich – und mit dem Klimaneutralitätsziel kompatibel – zu gestalten.

Des Weiteren zeigt die Klimaneutralität verstärkt, dass es erforderlich ist, kurzfristige Hürden zugunsten von mittel- bis langfristigen technischen und wirtschaftlichen Notwendigkeiten zu überwinden. Dies betrifft insbesondere öffentliche Investitionen in die Erforschung, Entwicklung und Pilotierung verschiedenster Minderungstechnologien in Zusammenarbeit mit dem privaten Sektor. Viele Technologien, die zur Erreichung der Klimaneutralität zwingend erforderlich sein könnten, genießen heute weder die Unterstützung von Lobbyorganisationen noch öffentliche Unterstützung oder eine Nachfrage seitens des Privatsektors und viele scheinen auch auf Jahre hinaus nicht wirtschaftlich. Dennoch können sich substanzielle Investitionen in Zukunftstechnologien in Form von Wettbewerbsvorteilen der heimischen Wirtschaft langfristig bezahlt machen und ein Erreichen der Klimaneutralität möglicherweise überhaupt erst ermöglichen (Honegger und Reiner, 2017).

Auch bei der öffentlichen Bereitstellung zentraler Infrastrukturen zeigt sich beispielsweise bei der Verkehrswende in puncto Elektromobilität, Batterieleistung und Ladestationen, dass der Staat Wegbereiter werden muss, um die angestrebte Transformation kurz- bis mittelfristig zu erreichen. Dabei muss die mit der Klimaneutralität verbundene Langfristperspektive auch bei Querschnittsthemen eingenommen werden, denn obwohl der heutige Strommix noch nicht CO₂-frei ist, muss die Verkehrswende heute angelegt werden, damit der Transportsektor in Zukunft – dank der Energiewende – nahezu emissionsfrei werden kann.

Die Klimaneutralität zeigt auch mögliche Konfliktpotenziale zwischen Minderungsmaßnahmen auf, wobei insbesondere bei der Diskussion um CO₂-Entfernungspraktiken oft die Befürchtung ausgesprochen wird, dass deren Finanzierung automatisch Ressourcen und Kapazitäten bindet, die dann anderen Minderungsmaßnahmen wie beispielsweise dem Ausbau der erneuerbaren Energien nicht mehr zur Verfügung stehen. Andererseits stellt die Klimaneutralität ein derart umfassendes Ziel dar, dass aus einer scheinbaren Konkurrenz eine synergetische Umsetzung entstehen muss, die sowohl konventionelle Minderungspraktiken als auch die CO₂-Entfernung mobilisiert. Beispielsweise könnte eine Nutzung von Biomasse-Strom mit CCS andere erneuerbare Stromproduktionskapazitäten möglicherweise gut ergänzen und Fluktuationen ausgleichen.

3.3 Politische Verteilungskonflikte innerhalb der EU

Die Frage der Klimaneutralität Europas hat das Potenzial, die Verhandlungen um die Lastenverteilung innerhalb der EU neu zu entfachen. Bedeutet ein EU-weites Klimaneutralitätsziel bis 2050, dass alle Staaten bis dahin klimaneutral sein müssen? Bestünde die Möglichkeit, dass einzelne Antreiberstaaten ihre Ziele übererfüllen und eine netto-negative Emissionsbilanz erreichen, um weiter bestehende Emissionen in Nachzügler-Staaten somit auszugleichen? Für dieses Szenario spricht, dass Polen, Ungarn und Tschechien Bedenken geäußert haben, konsequente nationale Minderungspolitik innerhalb der nächsten 30 Jahre einzuführen. EU-Nachzügler-Staaten werden voraussichtlich über verschiedene Kanäle (EU Recovery Fund und Just Transition Fund) finanziell unterstützt, wobei diese Unterstützung mit der Erwartung verbunden ist, dass sie die nationale Treibhausgasneutralität bis 2050 ermöglicht.

Der politische und legislative Prozess des Green Deal zeigt die damit verbundenen Machtkämpfe auf. Obwohl sich die europäischen Kommissare auf solch ein Dokument einigen konnten, bedeutet dies noch nicht die Ratifizierung. Die erste politische Hürde stellte die Diskussion im Europäischen Rat dar, bei der die europäischen Staats- und Regierungschefs zu einer Konsenslösung kommen mussten – und bei der einzelne Staaten Widerstand leisten und damit günstige Bedingungen aushandeln konnten. Nachdem alle anderen EU-Staaten dem Klimaneutralitätsplan zugestimmt hatten, äußerte Polen Zweifel an der Umsetzung dieser Zielvorgabe bis 2050. Die Abhängigkeit Polens von der auf Kohle basierten Energieerzeugung und die politische Relevanz der Kohleindustrie stellen eine signifikante Hürde für eine nationale Klimaneutralität bis 2050 dar. So scheint Polen aktuell nicht willens, ein exaktes Datum für Netto-Null-Emissionen zu nennen (Mathiesen, 2019).

Mit der Formulierung des Netto-Null-Ziels für 2050 im Entwurf des EU-Klimaschutzgesetzes²⁰ gehen auch eine Nachbesserung und Verschärfung der EU-NDC für 2030 einher. Bei einem Emissionsverlauf wie derzeit erscheint das Erreichen der 40%-Reduktion aller THG wahrscheinlich, sodass die EU hier aus dreierlei Gründen eine Verschärfung auf mindestens 50 % bis 55 % Reduktion einleiten könnte, wie von Kommissionspräsidentin von der Leyen vorgeschlagen: Erstens würde dies den Schritt zur Klimaneutralität 2050 wesentlich realistischer machen, da die vollständige Dekarbonisierung sich als wesentlich schwieriger herausstellen könnte als die bisherige leichte Beschleunigung des Abwärtspaths. Zweitens würde dies erlauben, wieder mit Deutlichkeit die frühere klimapolitische Vorreiterrolle einzunehmen und andere Staaten zu einer Ambitionssteigerung zu bewegen (Geden und Schenuit, 2019a). Drittens ist zu erwarten, dass die damit

²⁰ Siehe Dokument COM(2020) 80 final, 2020/0036 (COD): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law): https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/commission-proposal-regulation-european-climate-law-march-2020_en.pdf

verbundenen Weichenstellungen der Wirtschaft die notwendigen Signale geben würden, die kritischen Zukunftsindustrien in der EU zur Erarbeitung eines nachhaltigen internationalen Wettbewerbsvorteils verhelfen könnten (anstatt wie im Fall der Elektromobilität oder im Bereich der Stromspeicherung von anderen Weltregionen überholt zu werden). Die zunehmende Präsenz des Begriffs Klimaneutralität könnte auch zusätzlichen Impetus dafür schaffen, dass ein Überschießen von THG-Budgets unbedingt zu vermeiden ist (wozu die Verschärfung des Ziels für 2030 ebenfalls notwendig scheint). Allerdings hat sich bereits Widerstand formiert, sodass die EU ihr vorheriges THG-Minderungsziel von mindestens 40 % (gegenüber 1990) möglicherweise nur graduell auf mindestens 50 % bis 55 % steigern dürfte.

Ein letzter EU-spezifischer Konfliktfall könnte sich mit dem vollzogenen Austritt Großbritanniens aus der EU ergeben. Die EU verliert mit Großbritannien einen Mitgliedsstaat mit einem weit überdurchschnittlichen Reduktionsbeitrag, wodurch die jetzigen relativen Reduktionszahlen der EU schlechter ausfallen. Ebenfalls fällt ein klimapolitisch verhältnismäßig progressives Land weg, das sich schon weitaus mehr mit den Fragen um die Klimaneutralität auseinandergesetzt hat und sie legislativ angegangen ist als Deutschland. Hinzu kommt, dass Großbritannien als Gastgeber der COP 26 ein Eigeninteresse daran haben dürfte, sich als klimapolitisch progressiver Akteur mit einem Netto-Null-Emissionsziel und entsprechenden Maßnahmenplänen zu präsentieren, was im besten Fall einen gesunden Wettstreit mit den verbleibenden EU-27-Staaten auslösen könnte (Geden und Schenuit, 2019b).

3.4 Implikationen für die sektorale Wirtschafts- und Klimapolitik

Im Sinne des Risikomanagements muss die Klimaneutralität in jedem einzelnen Sektor mitgedacht und angestrebt werden. Aufgrund unterschiedlicher Voraussetzungen und Maßnahmenpotenziale werden einzelne Sektoren selbstverständlich früher als andere das Ziel erreichen, aber eine optimale Allokation über viele Jahre hinaus lässt sich angesichts der technologischen Unsicherheiten nicht im Voraus verlässlich vorhersagen. In vielen Sektoren scheint bisher kaum eine systematische Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten zur (nahezu) kompletten Dekarbonisierung sowie zur aktiven Entfernung von CO₂ stattzufinden. Das Verankern von sektorspezifischen Klimaneutralitätszielen mit damit kompatiblen Meilensteinen könnte hier die notwendige Klarheit schaffen, wohin die Reise langfristig gehen soll, und wichtige Auseinandersetzungen beflügeln (dena, 2018a).

Auch wenn die klimapolitischen Pfade im Energiesektor wohl recht deutlich umrissen sind (BMW, 2018; Leopoldina, acatech und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, 2020; Agora Energiewende, 2020; dena, 2018a), könnte ein Zuwenden hin zur Klimaneutralität eine verschärfte Gangart und möglicher-

weise ein Überdenken bisheriger Ziele und regulatorischer Voraussetzungen mit sich bringen. Insbesondere fehlt hier bisher noch jede Auseinandersetzung mit der möglichen Nutzung von Biomasse-Kraftwerken mit CCS zur Stromerzeugung und gleichzeitigen CO₂-Entfernung.

Auch im Transportsektor, der stark von Konsumentenentscheidungen abhängt, könnte der Klimaneutralitätsbegriff die Debatte beflügeln und deutlich machen, welche Formen des Transports langfristig bestehen und welche maximal als Übergangstechnologien eingesetzt werden können oder aufgrund ihrer Inkompatibilität und Infrastruktur-Intensität gar zu vermeiden sind. Unter den Übergangstechnologien sind unter anderem hybride Antriebstechnologien zu nennen, die aufgrund ihres Treibstoffgebrauchs in einer klimaneutralen Welt kaum oder gar nicht mehr zur Anwendung kommen könnten. Unter den auch langfristig einsetzbaren Technologien sind insbesondere die Batterie-Elektromobilität (die langfristig einen CO₂-freien Strommix bedingt) sowie die Wasserstoff-Elektromobilität (die langfristig eine CO₂-freie Wasserstoffherstellung und -verteilung bedingt) hervorzuheben. Bei allen Mobilitätsformen knüpft sich im Kontext der Klimaneutralität die Frage nach einem kreislaufwirtschaftlichen System an, bei dem Materialien und Bestandteile in der weiteren Produktion wieder eingesetzt oder einer anderen Nutzung zugeführt werden (wie z. B. Lithiumbatterien, die künftig als Bestandteil eines smarten Stromnetzes zum Einsatz kommen). Der Zeitdruck, den die Diskussion der Klimaneutralität verdeutlicht, deutet zudem auf eine notwendige Beschleunigung bei Investitionen beispielsweise in den Ausbau der Ladeinfrastruktur hin, welche bei einer entsprechenden Adoption von BEVs (Battery Electric Vehicles, batteriebetriebene Elektrofahrzeuge) einer logistischen Wachstumskurve folgen muss. Damit verknüpft ist auch die Notwendigkeit, das Stromnetz durch Digitalisierung zu verstärken, um als Smartgrid die Speicherkapazitäten einer wachsenden Elektroautoflotte zu nutzen und die größeren Ströme (z. B. auch für Ladestationen für elektrische Lkws bei Logistikzentren) ermöglichen zu können (dena, 2010). Ebenfalls könnten auch Investitionen in den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) geplant werden, um eine Verschiebung des Personen- und Güterverkehrs aus der Luft auf die Schiene zu ermöglichen. Beim (internationalen) Schiffs- und Flugverkehr könnte ein Klimaneutralitätsziel bisherige Paradigmen überwerfen, wobei sich grundlegend neue Maßnahmen aufdrängen könnten: Klimaneutrale synthetische Treibstoffe und die vollumfängliche Kompensation anfallender Emissionen durch CO₂-Entfernungsprojekte bis hin zum eigentlichen Verzicht auf solche Mobilitätsvarianten wären Ansätze, die bei einem konsequent verfolgten Klimaneutralitätsziel zum Tragen kämen.

Bei industriellen Prozessen sind bisherige Minderungsmaßnahmen weitgehend auf Verbesserungen der Energieeffizienz zurückzuführen (BMW, 2019). Hier gibt es weiterhin Potenziale, allein sind solche Maßnahmen jedoch nicht ausreichend für die

Klimaneutralität: Nur eine vollständige Eliminierung CO₂-intensiver Brennstoffe oder der konsequente Einsatz von CCS könnte in der industriellen Produktion Klimaneutralität bewirken.²¹ Dabei ist jedoch die Nutzung CO₂-freier Energieträger dem Einsatz von CCS vorzuziehen, da Letzterer Emissionen nicht vollständig vermeiden kann und beschränkte CO₂-Speicherstätten in Konkurrenz zu anderen Maßnahmen stehen. Darüber hinaus kann jedoch eingefangenes CO₂ auch als Rohstoff zur Produktion verschiedener Chemikalien, Treibstoffe oder Baumaterialien genutzt werden. Solche Möglichkeiten und ihre unterschiedlichen zeitlichen Speicherkomponenten werden jedoch bisher nicht systematisch erörtert. Auch hier kann eine Fokussierung auf Klimaneutralität die systematische Auseinandersetzung zwischen der Privatwirtschaft, den Verbänden und der Politik beflügeln.

Auch in der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion könnte die Klimaneutralität neue Diskussionen katalysieren, die teilweise stark mit dem Konsumentenverhalten verknüpft sind: Schwierigkeiten, bestehende Emissionen in der Tierhaltung zu eliminieren, sowie die nahezu unvermeidbaren THG-Emissionen, die durch den Einsatz von künstlichen Düngemitteln bedingt sind, könnten Diskussionen um den Fleischkonsum sowie um die Möglichkeiten einer veränderten Bearbeitung von Böden (zur Steigerung ihrer CO₂-Speicherkapazität) eröffnen.

Die Forstwirtschaft stellt wiederum einen Sektor dar, der für sich allein oder in Kombination mit der Nutzung von Holz als Baumaterial oder zur Energiegewinnung mit CCS eine Senkenwirkung haben kann. Insofern würde eine Fokussierung auf die Klimaneutralität wohl die verschiedenen Funktionen von Wäldern hervorheben und die Nutzung forstlicher Ressourcen vor dem Hintergrund des CO₂-Senkenpotenzials neu beleuchten.

Im Gebäudesektor teilt sich eine klimaneutrale Strategie wohl auf Bestandsgebäude und auf neu zu bauende Gebäude auf (geea, 2019, dena 2018b). Bei beiden Typen ließen sich deutliche Emissionseinsparungen erzielen, das Erreichen von null Emissionen erscheint jedoch im Bereich der alten Bestände wesentlich schwieriger. Auch hier ist zu erwarten, dass eine Fokussierung auf Klimaneutralität mit einem definierten Datum eine verschärfte Gangart bedingen würde. Außerdem könnte auch hier die Debatte um Brückentechnologien (wie effizientere Gasheizungen oder Boiler) neu beleuchtet werden und Maßnahmen zur Adoption von klimaneutralitätskompatiblen Technologien (wie Biomasse-Heizungen und Wärmepumpen, die langfristig einen CO₂-freien Strommix bedingen) verschärfen. Das Gleiche gilt für die in Neubauten genutzten Materialien, die vor dem Hintergrund der Klimaneutralität wohl vermehrt auf ihre CO₂-Bilanz geprüft werden, wobei hier gar CO₂-negative Bilanzen erreicht werden könnten (durch die Nutzung von Holz, neuartigem Beton und Stahlersatz aus Kohlenstoff), was in zunehmendem Maße zum Standard bei Neubauten werden könnte.

3.5 Verhalten des Erdsystems bei Klimaneutralität

Bei Erreichen von globaler Klimaneutralität – einem Zustand, in dem sämtliche Faktoren (mensen-gemachte sowie erdsystembedingte THG, Aerosole, Wolken und oberflächenspezifische Albedo), welche die Energiebilanz des Planeten beeinflussen, ausgeglichen sind – stabilisiert sich die globale Durchschnittstemperatur. Das Volumen der bis zu diesem Zeitpunkt emittierten und entfernten THG sowie das Verhalten des Erdsystems in Bezug auf verstärkende oder mildernde Rückkopplungen entscheidet darüber, bei welcher Temperatur sich das System stabilisiert. Dieses Erdsystemverhalten wird als Klimasensitivität bezeichnet (die Erwärmung bei Verdoppelung des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre). Die Spannweite der möglichen effektiven Klimasensitivität ist seit Beginn der Klimaforschung im Wesentlichen unverändert geblieben, da sie der inhärenten Unvorhersehbarkeit potenziell signifikanter Erdsystem-Rückkopplungen geschuldet ist, die sich als komplexe Systeme einer deterministischen Prognose entziehen (IPCC, 2018).

Das bedeutet, dass die globalen CO₂-Budgets nicht als absolute Werte verstanden werden dürfen, bei deren Einhalten die Temperaturziele mit Sicherheit nicht verfehlt werden. Vielmehr können sie Orientierungspunkte darstellen, innerhalb derer eine Risiko-Management-Strategie die Wahrscheinlichkeiten ungünstiger Entwicklungen (wie z. B. das Versagen anderer Staaten in ihren Beiträgen sowie natürliche Rückkopplungs-effekte) mit einzukalkulieren hat.

Bei einem Überschießen von THG-Budgets, insbesondere dem für 2 °C, nehmen die Unsicherheiten und Risiken zu: Die Wahrscheinlichkeit eines Überschreitens von Erdsystem-Kippunkten – wonach sich die Erwärmung weiter beschleunigen könnte – steigt mit der Temperatur. Außerdem sinkt die Aufnahmefähigkeit der Ozeane mit steigendem CO₂-Gehalt, wodurch sich mehr und mehr der vom Menschen verursachten CO₂-Emissionen auch tatsächlich in der Atmosphäre akkumulieren. Dabei ist jedoch zu betonen, dass jede Annäherung an die Klimaneutralität Risiken und Schäden reduziert und gerechtfertigt ist – auch wenn sie gemessen am globalen Ausmaß gering scheinen mag. Dies gilt auch dann, wenn die Menschheit insgesamt die Temperatur-Zielwerte überschreiten sollte.

Selbst eine Welt, in der die globale Erwärmung auf 1,5 °C oder 2 °C in 2100 beschränkt bleibt, unterscheidet sich dramatisch von der vorindustriellen Welt in Bezug auf Wetterextreme, den Meeresspiegelanstieg, die Ökosystemschwächung, die Unterbrechung von Wirtschaftsketten oder die Versorgungssicherheit, wodurch die Erreichung gesellschaftlicher Ziele wie der SDGs gefährdet wäre (IPCC, 2018, 2019a, 2019b). Dies zeigt sich bereits deutlich bei der heutigen Erwärmung um 1,1 °C (WMO, 2020),

²¹ Siehe hierzu beispielsweise das HYBRIT-Projekt von SSAB, LKAB und Vattenfall (HYBRIT, 2020).

wo die Zunahme extremer Wetterereignisse und die damit verbundenen Schäden für Mensch, Wirtschaft, Tier und Umwelt wie im Falle der diesjährigen Buschfeuer in Australien für jedermann sichtbar sind. Die Häufigkeit und das Ausmaß solcher Schäden nehmen mit zunehmender Temperatur ebenfalls zu. Selbst scheinbar geringe Unterschiede von einem halben Grad wirken sich je nach Erdsystemreaktion signifikant aus: Der Meeresspiegelanstieg könnte bei 2 °C Erwärmung im Vergleich zu 1,5 °C bis 2100 um ca. 0,1 Meter höher ausfallen; dies gilt jedoch nur, sofern das Grönland- oder das westantarktische Eis nicht früher schmelzen als erwartet. Ein völliges Abschmelzen, das innerhalb einiger Jahrhunderte möglich wäre, würde einen Meeresspiegelanstieg um 6 Metern mit sich bringen und somit die meisten Küstenstädte auf dem Globus überfluten. Die Wissenschaft kann allerdings kaum Aussagen zur Wahrscheinlichkeit solcher Entwicklungen (in Abhängigkeit von künftigen Temperaturen) machen, da sie komplexen Systemdynamiken geschuldet sind (IPCC, 2019b).

3.6 Implikationen für die Planung von CO₂-Entfernungsmaßnahmen

Die Klimaneutralität ist im Begriff, die Bedeutung von CO₂-Entfernungstechnologien für den Klimaschutz wesentlich zu verdeutlichen (Kuhlmann und Geden, 2020). Dies könnte eine systematische Erörterung der innerhalb verschiedener Sektoren einsetzbaren Technologien sowie eine sektorübergreifende Diskussion einleiten: Die Kombination von Bioenergie mit der geologischen Speicherung von CO₂ (BECCS) kann im Energiesektor zur CO₂-Entfernung führen. Im Industriesektor könnte CO₂ durch Nutzung von Abwärme durch das sogenannte Direct Air Capture (DAC) in Kombination mit CCS entfernt werden. DAC könnte auch die Grundlage zur Herstellung von neuartigen Materialien (CO₂-Nutzung, CCU) liefern, die wiederum zu einer CO₂-Entfernung führen könnte, wenn die Materialien langlebig sind. Gerade wo dies für energie- und treibhausgasintensive Materialien (Zement-, Stahl- oder Chemieproduktion) stattfindet, wäre ein signifikanter Effekt möglich (acatech, 2018). Aufforstungen, Moorrenaturierung sowie Ökosystempflege erlauben zudem, die natürlichen Kapazitäten zur CO₂-Aufnahme zu erhalten oder zu steigern.

Im Fall der CO₂-Entfernungstechnologien, die das unterirdische Speichern von CO₂ vorsehen (BECCS, DACCS), muss jedoch die politische Situation zumindest in Deutschland berücksichtigt werden. Historisch gab es in Deutschland starken Widerstand gegen die unterirdische Speicherung von CO₂. Ein Indikator für die häufig ablehnende Haltung ist die Verwendung des Begriffs „CO₂-Endlager“ für Speicherstätten, was diskursiv an die polarisierte Diskussion um Endlagerstätten für nuklearen Abfall anknüpft. Vor diesem Hintergrund haben im Jahr 2012 Bundestag und Bundesrat das CCS-Gesetz verabschiedet, das die jährliche maximale Speichermenge pro Speicher auf 1,3 Millionen Tonnen CO₂ und deutschlandweit auf 4 Millionen Tonnen CO₂ begrenzt. Zudem haben die Länder im Rahmen des CCS-Gesetzes das Recht, einer Speicherung von CO₂ auf ihrem Territorium zu widersprechen (BMW, 2020). Dieses Vetorecht wurde von Niedersachsen und Schleswig-Holstein durchgesetzt, den Ländern, denen, zusammen mit Brandenburg, das größte Speicherpotenzial zugesprochen wird. Vor diesem Hintergrund stellt CCS aus heutiger Sicht eine große politische Herausforderung dar, die jedoch im Kontext der Klimaneutralität aufwind erhalten könnte. Bis zur industriellen Nutzung von CCS in Deutschland muss auf Anlagen in anderen Ländern zurückgegriffen werden, was mit Transaktionskosten verbunden ist und mittelfristig auf deren Widerstand stoßen dürfte.

Generell bedarf es für die künftige groß angelegte Nutzung von CO₂-entfernenden Praktiken weiterer Forschung und Entwicklung im Zusammenspiel mit der Politik und anderen betroffenen Akteuren, da viele der hierunter fallenden Technologien noch in der frühen Entwicklungs- und Erprobungsphase sind. Skalierbarkeit, Potenzial-Kosten-Abschätzung oder auch Synergie- und Wechselwirkungen können ohne konkrete Erfahrungen schlecht eingeschätzt werden. Da ein Verharren in der jetzigen Situation mit dem Ziel der Klimaneutralität 2050 nicht vereinbar wäre, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Handlungsdruck weiter verstärken und eine übergeordnete Strategie zur CO₂-Entfernung dringend benötigt wird (Kuhlmann und Geden, 2020).

4. Fazit

Die Klimaneutralität im strikten Sinne, also eine Balance von Treibhausgasemissionen und Treibhaus-gasentfernung (gegebenfalls unter Berücksichtigung der Wirkung von Aerosolen), bildet mittlerweile in mehreren politischen Prozessen die zentrale, langfristige klimapolitische Ambition. Dabei ist sie eine komplexe klimapolitische Querschnittsthematik. Das Ziel der Klimaneutralität betrifft so gut wie alle Sektoren und Akteure, von der subnationalen bis hin zur internationalen Ebene. Es spitzt viele bisher unterschwellige Anforderungen und Transformationsprozesse weiter zu und fördert die Notwendigkeit einer bewussten gesellschaftlichen Auseinandersetzung zutage. Dies betrifft auch die Frage, inwieweit Brückentechnologien einen sinnvollen Beitrag leisten können und welche Technologien und Politikmaßnahmen generell mit einer klimaneutralen Welt kompatibel oder gar für ihre Erreichung notwendig sind. Daran anschließend stellt sich die Frage, in welchen Bereichen und auf welche Art politische Akteure gestalterisch tätig werden sollten. Das betrifft ganz zentral die CO₂-Entfernungstechnologien, deren Zweck es ist, etwaige unvermeidbare Emissionen auszugleichen.

Das Konzept der Klimaneutralität schafft auch neue Konfliktfelder. Sollten die durch das Konzept der Klimaneutralität gestützten, hoch ambitionierten Klimaziele nicht erreicht werden, könnte dies beispielsweise das öffentliche Vertrauen in eine Politik unterminieren, von der erwartet wird, dass sie auf zunehmenden zivilgesellschaftlichen Druck reagiert und eine progressive, wissenschaftsbasierte Klimapolitik betreibt. Zudem verspricht die Geschwindigkeit der Transformation, in vielen Bereichen mit trägeren Entwicklungsprozessen sozialer und wirtschaftlicher Strukturen in Konflikt zu geraten.

Andererseits verwenden Unternehmen und andere Akteure das Konzept der Klimaneutralität in seiner schwachen Variante und können so klimapolitische Ambition signalisieren, ohne mittelfristig notwendige tiefgreifende Umstrukturierungen ihrer Aktivitäten vorzunehmen. Hier bedarf es einer Standardisierung und Transparenz der Ansätze sowie der Mess- und Berechnungsmethoden, um nicht Äpfel und Birnen zu vergleichen, sodass strukturell erforderliche Prozesse nicht durch „Greenwashing“ unterminiert werden und glaubwürdige Leistungen auch langfristig auf eine breite gesellschaftliche Unterstützung hoffen dürfen.

Unternehmen und Dienstleistungsanbieter wie auch Städte, Staaten und die EU insgesamt haben wiederholt angekündigt, in den kommenden Jahrzehnten CO₂- oder Klimaneutralität anzustreben. Dies ist einerseits ermutigend, eine genauere Betrachtung zeigt aber auf, wie tiefschürfend und schnell die Transformation über sämtliche Bereiche hinweg sein muss, um die Pariser Ziele zur Begrenzung des Temperaturanstiegs zu erreichen. Daraus ergeben sich zahlreiche Koordinationsnotwendigkeiten: So müsste die vollständige Dekarbonisierung im Energie-, Verkehrs-, Industrie-, Landwirtschafts- und Gebäudereich angestrebt und es müssten bisher unbeachtete Maßnahmen zur CO₂-Entfernung in engem Austausch zwischen Wirtschaft, Politik, Forschung und Gesellschaft identifiziert, geplant und umgesetzt werden. Auch müssen Zwischenziele der EU wie auch Deutschlands deutlich verschärft werden, um das Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 ohne Überschießen der THG-Budgets im Bereich des Machbaren zu halten.

Vor dem Hintergrund dieser Herausforderung wäre ein zielstrebiges, vertrauensvolles und partizipatives Zusammenspiel der verschiedenen Akteursgruppen eine zwingende Voraussetzung, um entsprechende Lösungsstrategien zu erarbeiten und zu implementieren. Eine frühzeitige, systematische, offene und lösungsorientierte Auseinandersetzung mit der Thematik dürfte dabei für alle Beteiligten sinnvoll sein.

Anhang

Technologietyp	Beschreibung	Globales technisches Potenzial (Gt CO ₂ /a) ^a	Mögliche Synergien und Zielkonflikte	Mögliche Kosten (USD/t CO ₂) ^b
Aufforstung, verbessertes Forstmanagement	CO ₂ -Absorption durch Erhöhung der Biomasseproduktion	0,5 – 7	Pro: Bodenqualität, Wasserkreislauf, Biodiversität Contra: Landbedarf, kontinuierliche Pflege notwendig	0 – 240
Renaturierung	Wiederherstellung von Ökosystemen mit großen CO ₂ -Aufnahmepotenzialen	keine Daten	Pro: Anpassungskapazität, Wasserbalance, Biodiversität Contra: mehr Methanemissionen, Energiebalance und Verdunstung	keine Daten
Bioenergie kombiniert mit geologischer Speicherung von CO₂ (BECCS)	Energieproduktion aus Biomasse (wenn möglich Abfälle) und Abscheiden des entstehenden CO ₂	1 – 85	Pro: Geschäftsmodell Contra: Energiebedarf, Landbedarf, Biodiversität	15 – 400
Einlagerung von Pflanzenkohle im Boden	Kohlenstoffspeicherung durch Einlagerung von Biokohle im Boden	1 – 35	Pro: Weniger N ₂ O- und CH ₄ -Emissionen, Bodenqualität Contra: Wärmeabsorption, CO ₂ -Bilanz	10 – 345
Kohlenstoffspeichernde Bodenbearbeitung in der Landwirtschaft	Steigerung des Kohlenstoffgehalts in landwirtschaftlichen Böden durch humusaufbauende Bearbeitungsmethoden	0,5 – 11	Pro: Weniger Säure, Bodenqualität, bessere Ernte Contra: Auswirkungen auf Ökosysteme, lokale Effekte	- 45 – 100
Beschleunigte Verwitterung in Böden oder Ozeanen und Verstärkung der Alkalinität der Ozeane	Beschleunigte CO ₂ -bindende Verwitterung durch Zerkleinerung von Gestein und Verteilung am Boden bzw. im Ozean und Ausbringen von basischen Mineralien, um die CO ₂ -Aufnahme zu steigern und der Ozeanversauerung entgegenzuwirken	0 – 100	Pro: Weniger Säure, Bodenqualität, bessere Ernte Contra: Auswirkungen auf Ökosysteme, Energiebedarf, lokale Effekte	15 – 3.460
Direktes Einfangen aus der Luft und CCS (DACCS)	Chemische Abscheidung von CO ₂ aus der Luft und geologische Einlagerung	0,5 – 5	Pro: Geschäftsmodell Contra: Kostenfaktor, Energiebedarf, Wasserbedarf	25 – 1.000
Ozean-Düngung	Erhöhung des Planktonwachstums gefolgt von Absinken und Ablagerung der Biomasse (durch Zugabe von limitierenden Mineralstoffen)	0,5 – 44	Pro: Fischfangsteigerung Contra: Auswirkungen auf Ökosysteme, lokale Effekte	0 – 460

Tabelle 1: Ansätze zur Entfernung und Speicherung (oder Nutzung) von CO₂

^{a, b} Die Daten zu Potenzialen und Kosten geben globale Schätzungen wieder, basieren auf unterschiedlichen Annahmen und sind zudem sehr technik- und standortspezifisch, sodass die Spannweite mitunter sehr groß ist. Die Daten sind an die Zusammenstellungen von Fuss et al. (2018), Nemet et al. (2018) und Minx et al. (2018) angelehnt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Globale Temperaturanomalie 1850 bis 2019 (Referenzzeitraum 1961 bis 1990), Quelle: Kaspar et al. (2020)	8
Abbildung 2: Globale Emissionskurve 1990 bis 2019, Quelle: Global Carbon Project (2019)	9
Abbildung 3: CO ₂ -Neutralität, THG-Neutralität und Klimaneutralität	11
Abbildung 4: Der Unterschied beim Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) bei einem fossilen Kraftwerk oder bei einem Biomassekraftwerk. Ersterer führt zu einer Reduktion der CO ₂ -Emissionen, während Letzterer zu einer CO ₂ -Entfernung oder Negativemissionen führen kann.	12
Abbildung 5: Lineare globale CO ₂ -Netto-Emissionspfade, die (mit mindestens 50 % Wahrscheinlichkeit) mit einer Erreichung des 1,5-°C- (grün) und 2-°C-Ziels (blau) ohne Überschießen kompatibel wären (eigene Darstellung).....	19
Abbildung 6: Minderungspfade, die zu einer 1,5-°C-kompatiblen Klimaneutralität ohne Overshoot führen würden, bedürften in Abhängigkeit vom Startzeitpunkt massivster globaler Maßnahmen. Hätte der Absenkpfad schon im Jahr 2000 begonnen, wäre er noch verhältnismäßig flach ausgefallen, bei einem Beginn in 2020 müssen die Emissionen im Jahr 2032 auf 20 % reduziert sein. Quelle: Carbon Brief (2019)	19
Abbildung 7: Entwicklung der THG-Emissionen Deutschlands seit 1990, Quelle: UBA (2020)	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ansätze zur Entfernung und Speicherung (oder Nutzung) von CO ₂	30
--	----

Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (2020): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019, <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/die-energiewende-im-stromsektor-stand-der-dinge-2019/> (Download 07.01.2020).

Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) (2019): Notwendige Instrumente zur Erreichung der Energie- und Klimaziele 2030 im Gebäudebereich, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/geea_Notwendige_Instrumente_zur_Erreichung_Klimaschutzziele_2030_Gebaeude.PDF (Download 07.01.2020).

Bennett, V. (2019): 2019, the year the world woke up to climate change, <https://www.ebrd.com/news/2019/2019-the-year-the-world-woke-up-to-climate-change.html> (Download 07.01.2020).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2019): Klimaschutz in Zahlen, Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik 2019, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf (Download 07.01.2020).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die weitere Entwicklung von CCS-Technologien, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/weitere-entwicklung-ccs-technologien.html> (Download 07.01.2020).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Energieeffizienz in Zahlen – Entwicklungen und Trends in Deutschland 2019, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=72 (Download 14.10.2020).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2018): Die Energie der Zukunft, Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=33 (Download 07.01.2020).

Carbon Brief (2019): UNEP: 1.5C climate target ‘slipping out of reach’, https://www.carbonbrief.org/unep-1-5c-climate-target-slipping-out-of-reach?utm_content=buffer6ba42&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer (Download 07.01.2020).

Carbon Neutral Cities Alliance (CNCA) (2020): <https://carbonneutralcities.org/cities/> (Download 07.01.2020).

Carbon Neutrality Coalition (CNC) (2020): Members of the Carbon Neutrality Coalition, <https://www.carbon-neutrality.global/members/> (Download 07.10.2020).

Climate Action Tracker (CAT) (2020): Climate action tracker, <https://climateactiontracker.org/> (Download 07.01.2020).

Climate Watch (2020): 2020 NDC Tracker, <https://www.climatewatchdata.org/2020-ndc-tracker> (Download 07.01.2020).

Committee on Climate Change (CCC) (2020): About the Committee on Climate Change, <https://www.theccc.org.uk/about/> (Download 07.01.2020).

Darby, M. (2019): Which countries have a net zero carbon goal? Climate Home News, <https://www.climatechangenews.com/2019/06/14/countries-net-zero-climate-goal/> (Download 07.01.2020).

Deutsche Akademien der Technikwissenschaften (acatech) (Hrsg.) (2018): CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie, https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/09/acatech_POSITION_CCU_CCS_WEB-002_final.pdf (Download 07.01.2020).

Deutsche Energie-Agentur (dena) (2018a): Integrierte Energiewende, dena-Leitstudie, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf (Download 07.01.2020).

Deutsche Energie-Agentur (dena) (2018b): dena-GEBAÜDEREPORT KOMPAKT 2019, Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf (Download 14.10.2020).

Deutsche Energie-Agentur (dena) (2010): dena-Netzstudie II. – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9106_Studie_dena-Netzstudie_II_deutsch.PDF (Download 16.10.2020).

du Pont, Y. R.; Jeffery, M. L.; Gütschow, J.; Reogelj, J.; Christoff, P.; Meinshausen, M. (2017): Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals, in: *Nature Climate Change*, 7 (1), S. 38–43.

Europäische Kommission (2020a): Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020PC0080> (Download 14.10.2020).

Europäische Kommission (2020b): Financing a Sustainable European Economy – TEG final report on the EU taxonomy, https://ec.europa.eu/info/files/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy_de (Download 14.10.2020).

Europäische Kommission (2019): The European Green Deal, Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> (Download 07.01.2020).

Europäische Kommission (2018a): 2050 long-term strategy, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en (Download 07.01.2020).

Europäische Kommission (2018b): A Clean Planet for all – A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee, the committee of the regions and the European investment bank, COM (2018) 773, <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2018/EN/COM-2018-773-F1-EN-MAIN-PART-1.PDF> (Download 07.01.2020).

Europäische Kommission (2018c): In-depth analysis in support on the COM (2018) 773, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf (Download 07.01.2020).

European Academies Science Advisory Council (EASAC) (2018): Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? EASAC policy report 35, February 2018. European Academies' Science Advisory Council, Halle.

European Environment Agency (EEA) (2019): Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2017 and inventory report 2019, <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2019> (Download 07.01.2020).

Farand, C. (2019): European Investment Bank ends lending to fossil fuel projects, <https://www.climatechangenews.com/2019/11/15/european-investment-bank-ends-lending-fossil-fuel-projects/> (Download 07.01.2020).

Frischmann, C.J.; Mehra, M.; Allard, R.; Bayuk, K.; Gouveia, J.P.; Gorman, M.R. (2020): Drawdown's "System of Solutions" Helps to Achieve the SDGs, in: Leal Filho, W.; Azul, A.; Brandli, L.; Lange Salvia, A.; Wall, T. (eds): *Partnerships for the Goals. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer, Cham.

Fuglestad, J.; Rogelj, J.; Millar, R. J.; Allen, M.; Boucher, O.; Forster, P. M.; Kriegler, E.; Shindell, D. (2018): Implications of possible interpretations of 'greenhouse gas balance' in the Paris Agreement, in: *Philosophical Transactions Royal Society A*, 376, 20160445.

Fuss, S.; Lamb, W. F.; Callaghan, M. W.; Hilaire, J.; Creutzig, F.; Amann, T.; Beringer, T.; Garcia, W. de O.; Hartmann, J.; Khanna, T.; Luderer, G.; Nemet, G. F.; Rogelj, J.; Smith, P.; Vicente, J. L. V.; Wilcox, J.; Dominguez, M. del M. Z.; Minx, J. C. (2018): Negative emissions – Part 2: costs, potentials and side effects, in: Environmental Research Letters 13 (6), 063002.

Geden, O.; Schenuit, F. (2020): Unkonventioneller Klimaschutz – Gezielte CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre als neuer Ansatz in der EU-Klimapolitik, SWP-Studie 2020, <https://www.swp-berlin.org/publikation/eu-klimapolitik-unkonventioneller-klimaschutz/> (Download 10.05.2020).

Geden, O.; Schenuit, F. (2019a): Konfliktfeld Klimaneutralität – Ausgestaltung des EU-Nullemissionsziels und Folgen für Deutschland, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 69 (11), S. 28–31.

Geden, O.; Schenuit, F. (2019b): Klimaneutralität als Langfrist-Strategie, SWP-Aktuell Nr. 38, <https://www.swp-berlin.org/10.18449/2019A38/> (Download 07.01.2020).

Global Carbon Project (2019): Supplemental data of Global Carbon Budget 2019, Version 1.0, <https://www.icos-cp.eu/GCP/2019> (Download 27.01.2020).

Hausfather, Z. (2018): Analysis: How much ‘carbon budget’ is left to limit global warming to 1.5C?, <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-much-carbon-budget-is-left-to-limit-global-warming-to-1-5c> (Download 07.01.2020).

Honegger, M.; Michaelowa, A.; Poralla, M. (2019): Net-zero emissions: The role of Carbon Dioxide Removal in the Paris Agreement. Policy Briefing Report. Perspectives Climate Research, Freiburg.

Honegger, M.; Reiner, D. (2018): Global Policy Instruments to Mobilize Carbon Dioxide Removal. Policy Brief by Perspectives and University of Cambridge.

Honegger, M.; Münch, S.; Hirsch, A.; Beuttler, C.; Peter, T.; Burns, W.; Geden, O.; Goeschl, T.; Gregorowius, D.; Keith, D.; Lederer, M.; Michaelowa, A.; Pasztor, J.; Schäfer, S.; Seneviratne, S.; Stenke, A.; Patt, A.; Wallimann-Helmer, I. (2017): Climate change, negative emissions and solar radiation management: It is time for an open societal conversation. White Paper by Risk-Dialogue Foundation St. Gallen for the Swiss Federal Office for the Environment.

Honegger, M.; Reiner, D. (2017): The political economy of negative emissions technologies: consequences for international policy design. Climate Policy, 18(3), S. 306–321.

Honegger, M.; Sugathapala, K.; Michaelowa, A. (2013): Tackling climate change – where can the generic framework be located?, in: Carbon & Climate Law Review, 7 (2), S. 125–135.

Horton, J.; Keith, D.; Honegger, M. (2016): Implications of the Paris Agreement for Carbon Dioxide Removal and Solar Geoengineering, Harvard Project on Climate Agreements Viewpoints, https://www.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/files/160700_horton-keith-honegger_vp2.pdf (Download 07.01.2020).

HYBRIT (2020): HYBRIT – towards fossil-free steel, <http://www.hybritdevelopment.com/> (Download 07.01.2020).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019a): Special Report on Climate Change and Land, Cambridge University Press, Cambridge.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2019b): Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Cambridge University Press, Cambridge.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2018): Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Cambridge University Press, Cambridge.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., Davidson, O.; de Coninck, H. C.; Loos, M.; Meyer, L. A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

Jackson, R. B.; Solomon, E. I.; Canadell, J. G.; Cargnello, M.; Field, C. B. (2019): Methane removal and atmospheric restoration, in: Nature Sustainability, 2, S. 436–438.

Kaspar, F.; Friedrich, K.; Imbery, F. (2020): 2019 global zweitwärmstes Jahr: Temperaturentwicklung in Deutschland im globalen Kontext, https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Download 29.01.2020).

Kuhlmann, A.; Geden O. (2020): Klimaneutralität: Deutschland braucht eine Strategie für CO₂-Speicher. Gastbeitrag auf Zeit Online, <https://www.zeit.de/wirtschaft/2020-10/klimaneutralitaet-deutschland-eu-senken-strategie-co2> (Download 14.10.2020).

Lawrence, M. G.; Schäfer, S.; Muri, H.; Scott, V.; Oschlies, A.; Vaughan, N.E.; Boucher, O.; Schmidt, H.; Haywood, J.; Scheffran, J. (2018): Evaluating Climate Geoengineering Proposals in the Context of the Paris Agreement Temperature Goals, in: Nature Communications, 9, DOI: 10.1038/s41467-018-05938-3.

Leopoldina; acatech; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2020): Energiewende 2030: Europas Weg zur Klimaneutralität. Gemeinschaftliche Ad-hoc-Stellungnahme der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, <https://www.acatech.de/publikationen/> (Download 14.10.2020).

Mathiesen, K. (2019): EU agrees ‘climate neutral’ target for 2050, but Poland stands alone, <https://www.climatechangenews.com/2019/12/13/eu-sets-climate-neutral-target-2050-poland-stands-alone/> (Download 20.01.2020).

Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) (2020): That’s how fast the carbon clock is ticking, <https://www.mcc-berlin.net/en/research/co2-budget/> (Download 20.01.2020).

Messner, D.; Schellnhuber, J.; Rahmstorf, S.; Klingensfeld, D. (2010): The budget approach: A framework for a global transformation toward a low-carbon economy, in: Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2, http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Journals/messner_etal_2010.pdf (Download 07.01.2020).

Michaelowa, A.; Espelage, M.; Müller, B. (2019): Negotiating cooperation under Article 6 of the Paris Agreement, European Capacity Building Initiative, Oxford, UK.

Michaelowa, A.; Allen, M.; Sha, F. (2018a): Policy instruments for limiting global temperature rise to 1.5°C – can humanity rise to the challenge?, in: Climate Policy, 18, S. 275–286.

Michaelowa, A.; Reinecke, S.; Hoch, S.; Geck, A.; Blum, M.; Honegger, M.; Arenz, C. (2018b): The Political Economy of Achieving 1.5°C – Potential and Limitations of Climate Policy Instruments, Policy Brief by Perspectives and University of Freiburg, https://www.perspectives.cc/fileadmin/Publications/The_Political_Economy_of_Achieving_1.5C.pdf (Download 07.01.2020).

Microsoft (2020): Microsoft will be carbon negative by 2030, <https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030/> (Download 07.01.2020).

Millar, R. J.; Fuglestedt, J. S.; Friedlingstein, P.; Rogelj, J.; Grubb, M. J.; Matthews, H. D.; Skeie, R. B.; Forster, P. M.; Frame, D. J.; Allen, M. R. (2017): Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5°C, in: *Nature Geoscience*, 10 (10), S. 741–747.

Ming, T.; de Richter, R.; Shen, S.; Caillil, S. (2016): Fighting global warming by greenhouse gas removal: destroying atmospheric nitrous oxide thanks to synergies between two breakthrough technologies, in: *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (7), S. 6119–6338.

Minx, J. C.; Lamb, W. F.; Callaghan, M. W.; Fuss, S.; Hilaire, J.; Creutzig, F.; Amann, T.; Beringer, T.; de Oliveira Garcia, W.; Hartmann, J.; Khanna, T.; Lenzi, D.; Luderer, G.; Nemet, G. F.; Rogelj, J.; Smith, P.; Vicente, L. V.; Wilcox, J.; del Mar Zamora, M. (2018): Negative emissions – Part 1: research landscape and synthesis, in: *Environmental Research Letters*, 13 (6), 063001.

Nemet, G. F.; Callaghan, M. W.; Creutzig, F.; Fuss, S.; Hartmann, J.; Hilaire, J.; Lamb, W.F.; Minx, J.C.; Rogers, S.; Smith, P. (2018): Negative emissions – Part 3: innovation and upscaling, in: *Environmental Research Letters*, 13 (6), 063003.

Pierrehumbert, R. T. (2014): Short-lived climate pollution, in: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, S. 341–379.

Pötter, B. (2019): Eine Milliarde Tonnen zu viel, <https://taz.de/CO2-Budget-fuer-Deutschland/!5642592/> (Download 07.01.2020).

Rahmstorf, S. (2019): Wie viel CO₂ kann Deutschland noch ausstoßen?, <https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/wie-viel-co2-kann-deutschland-noch-ausstossen/> (Download 07.01.2020).

Royal Society; Royal Academy of Engineering (2018): Greenhouse gas removal, Royal Society, London.

Schäfer, S.; Lawrence, M.; Stelzer, H.; Born, W.; Low, S.; Aaheim, A.; Adriázola, P.; Betz, G.; Boucher, O.; Carius, A.; Devine-Right, P.; Gullberg, A. T.; Haszeldine, S.; Haywood, J.; Houghton, K.; Ibarrola, R.; Irvine, P.; Kristjansson, J.-E.; Lenton, T.; Link, J. S. A.; Maas, A.; Meyer, L.; Muri, H.; Oschlies, A.; Proelß, A.; Rayner, T.; Rickels, W.; Ruthner, L.; Scheffran, J.; Schmidt, H.; Schulz, M.; Scott, V.; Shackley, S.; Tänzler, D.; Watson, M.; Vaughan, N. (2015): The european transdisciplinary assessment of climate engineering (eutrace): removing greenhouse gases from the atmosphere and reflecting sunlight away from earth, https://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/rz_150715_eutrace_digital.pdf (Download 07.01.2020).

Umweltbundesamt (UBA) (2020): Entwicklungen der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland in 2019, <https://www.umweltbundesamt.de/galerie/entwicklung-der-treibhausgasemissionen-in-2019> (Download 14.10.2020)

Umweltbundesamt (UBA) (2019a): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#textpart-1> (Download 07.01.2020).

Umweltbundesamt (UBA) (2019b): Erneuerbare Energien in Zahlen, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#textpart-1> (Download 07.01.2020).

United Nations Economic and Social Council (ECOSOC) (2019): Special edition: progress towards the Sustainable Development Goals, Report of the Secretary-General, <https://undocs.org/E/2019/68> (Download 07.01.2020).

United Nations Environment Programme (UNEP) (2019): The Emissions Gap Report 2019, UNEP, Nairobi.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (o. D.): NDC Registry, <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Home.aspx> (Download 07.01.2020).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2020): Climate Neutral Now, <https://unfccc.int/climate-action/climate-neutral-now> (Download 07.01.2020).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC); United Nations Development Programme (UNDP) (2019): The Heat Is On, Taking Stock of Global Climate Ambition, https://www.undp.org/content/dam/undp/library/planet/climate-change/NDC_Outlook_Report_2019.pdf (Download 07.01.2020).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015): The Paris Agreement, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (Download 07.01.2020).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2012): Doha amendment to the Kyoto Protocol, https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_english.pdf (Download 07.01.2020).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (1997): Kyoto Protocol to the UNFCCC, <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (Download 07.01.2020).

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (1992): UNFCCC, <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf> (Download 07.01.2020).

Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2009): Solving the climate dilemma: The budget approach, https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/sondergutachten/sg2009/pdf/wbgu_sn2009_en.pdf (download, 07.01.2020).

World Meteorological Organization (WMO) (2019): WMO Provisional Statement on the State of the Global Climate in 2019, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10108 (Download 07.01.2020).

World Meteorological Organization (WMO) (2020): WMO Provisional Statement on the State of the Global Climate in 2019, https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10108 (Download 14.10.2020).

Abkürzungen

BECCS	Energetische Nutzung von Biomasse in Kombination mit der Abscheidung und geologischen Speicherung von CO ₂ (Bioenergy with Carbon Capture and Storage)
BEV	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug (Battery Electric Vehicle)
CBDR-RC	Prinzip der gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und jeweiligen Fähigkeiten (Common but Differentiated Responsibilities and Respective Capacities)
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	CO ₂ -Abscheidung und -Verwendung (Carbon Capture and Utilization)
CCUS	CO ₂ -Abscheidung, -Verwendung und -Speicherung (Carbon Capture, Utilization and Storage)
CDR	CO ₂ -Entfernung (Carbon Dioxide Removal)
CO₂	Kohlendioxid
CO₂äq	Treibhausgaspotenzial eines Gases im Verhältnis zu CO ₂ (CO ₂ -Äquivalent)
CDM	Mechanismus für eine umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism)
COP	Vertragsstaatenkonferenz (Conference of the Parties)
DACCS	Direkte CO ₂ -Abscheidung aus der Atmosphäre (durch einen chemischen Prozess) und Einlagerung (Direct Air Carbon Capture and Storage)
EIB	Europäische Investitionsbank
ETS	Emissionshandel (Emissions Trading System)
EU	Europäische Union
Gt	Gigatonne
Gt CO₂/a	Gigatonnen CO ₂ pro Jahr
GWP	Treibhauspotenzial, das den relativen Beitrag eines THG zum Treibhauseffekt in CO ₂ ausdrückt (Global Warming Potential)
IPCC	Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LEDS	Langfristige Emissionsreduktionsstrategie (Low Emission Development Strategy)
NDC	National definiertes Klimaziel, das formal gegenüber der UNFCCC kommuniziert wird (Nationally Determined Contribution)
NET	Negativemissionstechnologie
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
RDD&D	Erforschung, Entwicklung, Demonstration und Förderung von Technologien (Research, Design, Development & Demonstration)
SDGs	Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (Sustainable Development Goals)
SO₂	Schwefeldioxid
t	Tonne
THG	Treibhausgas
UN	Vereinte Nationen (United Nations)
UNFCCC	UN-Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change)
USD/t CO₂	US-Dollar pro Tonne CO ₂
W/m²	Strahlungsleistung pro Fläche in Watt pro Quadratmeter

